

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Н.І. Бурау, О.О. Лук'янченко,
О.В. Костіна, С.О. Цибульник**

**СТРУКТУРНИЙ МОНІТОРИНГ
ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ
РЕЗЕРВУАРІВ**

Монографія

Київ 2019

УДК 629.735.083.2:620.179.1

ББК

Б 914

Рецензенти: М.О. Бондаренко - д-р техн. наук, доц. (Черкаський державний технічний університет)
В.П. Квасніков - д-р техн. наук, проф. (Національний авіаційний університет);

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 11 від 09 грудня 2019 р.)

Бурау Н.І.

Б 914 Структурний моніторинг вертикальних сталевих резервуарів [монографія]/ Н.І. Бурау, О.О. Лук'янченко, О.В. Костіна, С.О. Цибульник. - Київ: Центр учбової літератури, 2019.- 160 с.

ISBN

У монографії наведено результати досліджень та розробки комплексної системи для структурного моніторингу вертикальних сталевих резервуарів з еколого-небезпечними речовинами. Наведено результати моделювання резервуару як об'єкта в умовах експлуатаційних навантажень та при появі і розвитку пошкоджень, структурно-функціонального синтезу системи моніторингу, програмної реалізації блоків і підсистем, лабораторних випробувань макетного зразку системи.

Книга призначена для фахівців у галузі моніторингу та діагностики складних просторових об'єктів, наукових працівників, докторантів, аспірантів та студентів старших курсів вищих навчальних закладів.

УДК 629.735.083.2:620.179.1

ББК

ISBN

ПЕРЕДМОВА

Резервуари для зберігання еколого-небезпечних речовин (ЕНР) є об'єктами критичної інфраструктури, руйнування яких становить загрозу для навколишнього природного середовища, життя та здоров'я людей. Як складні просторові об'єкти вони за звичай характеризуються великою розмірністю, розподіленістю параметрів, нелінійністю, а їх експлуатація супроводжується комплексним впливом зовнішніх збурень, зміною умов і режимів функціонування, часто – віддаленістю та важко доступністю для обслуговування. Основним експлуатаційним фактором безпечного функціонування резервуарів є діагностика з метою визначення їх поточного функціонального стану та виявлення пошкоджень.

Для діагностики найчастіше використовуються такі методи неруйнівного контролю, як акустична емісія, ультразвукова дефектоскопія, вібраційна діагностика, тощо. Традиційно вдосконалення таких методів та засобів проводиться з метою підвищення точності, чутливості, збільшення швидкодії при виявленні дефектів та пошкоджень.

Але серед резервуарів з ЕНР є такі, що експлуатуються в критичних умовах – у важкодоступних місцях в умовах комплексного впливу навантажень, які часто перевищують розраховані значення, та характеризуються максимально жорсткими умовами щодо збереження їх цілісності та попередження витoku ЕНР. Експлуатаційні пошкодження, що виникають в елементах конструкцій резервуарів чи в місцях їх з'єднання, призводять до зменшення ресурсу, руйнування та експлуатаційної непридатності об'єктів. Тому для безаварійної експлуатації таких об'єктів необхідно своєчасно виявляти початкові пошкодження, проводити моніторинг їхнього розвитку та прогнозування граничного стану.

Розроблені за останнє десятиріччя методи, методики та технології діагностування як окремих елементів конструкцій, так і складних динамічних об'єктів, дозволяють створити діагностичні системи нового класу - комплексні інтелектуальні системи моніторингу технічного стану конструкцій в експлуатації. Такі системи за принципами побудови та функціонування відносяться до систем, що реалізують сучасну концепцію Structural Health Monitoring. Ця концепція зараз

активно розвивається за кордоном і передбачає неперервний та автономний контроль дефектів та пошкоджень, статичних та динамічних навантажень, взаємодії елементів конструкцій з навколишнім середовищем за допомогою мережі постійно прикріплених чи вбудованих чутливих елементів (сенсорів), що забезпечують цілісність конструкції об'єкту. Таким чином, комплексні системи забезпечують моніторинг життєвого циклу об'єктів для їх надійної та безпечної експлуатації.

Ця монографія є спробою узагальнити досвід та результати досліджень, проведених авторами протягом останнього десятиріччя за напрямком розробки комплексної системи структурного моніторингу вертикальних сталевих резервуарів з ЕНР, яка відповідає концепції Structural Health Monitoring. Не зважаючи на розроблені в світі загальні принципи та підходи до розробки таких систем, кожен об'єкт моніторингу накладає певні характерні обмеження та умови застосування тих чи інших методів та засобів діагностики в комплексній системі моніторингу. Тому одним з найважливіших етапів розробки системи є аналіз об'єкта моніторингу з метою встановлення залежності параметрів чи характеристик його поточного технічного стану від експлуатаційних навантажень та потенційних експлуатаційних пошкоджень. На основі результатів досліджень можуть бути обґрунтовані прийнятні методи діагностики та структура системи, розроблено відповідні засоби, алгоритмічне та програмне забезпечення.

В цій колективній праці авторами О.О. Лук'янченко та О.В. Костіною виконано значний обсяг моделювання резервуарів, результати якого наведено в розділі 2 та розділі 3 (аналіз впливу багатоосередкового пошкодження в п. 3.4 виконано за участю Н.І. Бурау). Розділи 5 та 6, присвячені розробці та програмній реалізації підсистем і блоків, розробці і дослідженню макетного зразку системи, написано С.О. Цибульником. Автором Н.І. Бурау виконано огляд стану проблеми у розділі 1, структурно-функціональний синтез системи у розділі 2 та загальна редакція монографії.

Автори висловлюють подяку доктору технічних наук, професору В.П. Кваснікову та доктору технічних наук, доценту М.О. Бондаренку, зауваження яких при рецензуванні рукопису сприяли покращенню змісту книги.

1. ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВУАРІВ З ЕКОЛОГО-НЕБЕЗПЕЧНИМИ РЕЧОВИНАМИ

1.1. Загальна характеристика резервуарів як об'єктів для зберігання еколого-небезпечних речовин

Резервуари для зберігання еколого-небезпечних речовин (ЕНР) – це об'єкти, спеціально обладнані відповідно до законодавства та нормативно-правових актів у сфері екологічної безпеки та безпеки людей. Вони відносяться до об'єктів підвищеної небезпеки, які в [1] визначаються як об'єкти, на яких використовуються, виготовляються, переробляються, зберігаються або транспортуються одна або кілька небезпечних речовин чи категорій речовин у кількості, що дорівнює або перевищує нормативно встановлені порогові маси. До таких об'єктів також відносяться й інші, пошкодження чи руйнування яких є реальною загрозою виникнення надзвичайної ситуації техногенного або природного характеру.

Резервуари призначені для довгострокового зберігання з метою подальшого знешкодження, утилізації, захоронення, використання таких видів ЕНР [2]:

- легкозаймистих речовин – газів, які при нормальному тиску і в суміші з повітрям стають легкозаймистими і температура кипіння яких при нормальному тиску становить 20°C або нижче;
- окислювачів – речовин, що підтримують горіння, викликають займання та/або сприяють займанню інших речовин у результаті окислювально-відновної екзотермічної реакції;
- горючих речовин – рідин, газів, що здатні самозайматися, а також займатися від джерела запалювання та самостійно горіти після його видалення;
- вибухових речовин – речовин, які при певних видах зовнішньої дії здатні на дуже швидке хімічне перетворення, що само розповсюджується з виділенням тепла і утворенням газів;
- токсичних та високотоксичних речовин – речовин, які здатні при впливі на живі організми призводити до їх загибелі;

- інших речовин, які становлять небезпеку для навколишнього середовища або життя людей.

Вимоги до об'єктів зберігання ЕНР встановлюються екологічними, санітарними, протипожежними та іншими нормами і правилами, згідно з якими місце і спосіб зберігання ЕНР повинні забезпечити [2,3]:

- відсутність або мінімізацію впливу ЕНР на навколишнє природне середовище;
- відсутність ризику виникнення небезпеки для здоров'я людей в результаті локального впливу ЕНР;
- недоступність ЕНР для сторонніх осіб;
- зведення до мінімуму ризику займання ЕНР;
- зручність здійснення контролю за технічним станом об'єкта, що містить ЕНР.

Попередження витоку ЕНР має забезпечуватися:

- контролем цілісності та загального технічного стану (ТС) об'єктів для зберігання;
- відповідністю зовнішніх збурень на об'єкт, які враховані при його проектному розрахунку;
- захистом об'єкта від зовнішніх впливів, значення (сила, характер дії, тощо) яких не враховані або перевищують проектні.

Вибір матеріалів для несучих конструкцій об'єктів для зберігання/утримання ЕНР залежить від багатьох умов: капітальності, довговічності, економічності та інших [2]. Наприклад, сталеві конструкції – конструкції, елементи яких виготовлені зі сталі й з'єднані зварюванням, заклепками або болтами. Завдяки високій міцності сталі такі конструкції надійні в експлуатації, мають малу масу й невеликі габарити в порівнянні з конструкціями з інших матеріалів. Основний їх недоліком є схильність до корозії, що вимагає періодичного проведення захисних заходів.

Сучасні металеві конструкції виготовляються головним чином зварними (зі зварними з'єднаннями їх елементів). Зварні конструкції мають такі переваги перед клепанними: економія металу (до 25%) у результаті більш повного використання перерізу й меншої ваги сполучних елементів, менша вартість (завдяки застосуванню відносно недорогого обладнання), щільність (герметичність зварювальних швів). Однак клепані конструкції більш надійні в умовах низьких температур, коли концентрації напружень, що сприяють виникненню крихкого руйнування конструкцій і напруження, що

розвиваються в місцях отворів для заклепок, істотно менше концентрацій у зварних швах.

Найбільш поширеними є зварні сталеві резервуари, а саме [4]:

- циліндричні резервуари вертикальні сталеві (РВС) зі стаціонарним конічним або сферичним дахом місткістю до 50000м^3 ;
- циліндричні РВС зі стаціонарним дахом і плаваючим понтоном місткістю до 50000м^3 ;
- циліндричні РВС з плаваючим дахом місткістю до 120000м^3 .

У таких конструкціях верхній зварний шов з дахом резервуара виконується ослабленим з метою запобігання руйнування при вибуху пароповітряної суміші всередині замкнутого обсягу резервуара.

Для зберігання відносно невеликих кількостей ЕНР можуть застосовуватися горизонтальні сталеві резервуари ємністю до 1000м^3 . Крім сталевих резервуарів у ряді випадків застосовуються також залізобетонні.

У залежності від призначення резервуари поділяються на дві групи:

- для зберігання рідин при надмірному тиску до $0,07\text{МПа}$ включно і температурі до 120°C ;
- для зберігання рідин під тиском понад $0,07\text{МПа}$.

Резервуари можуть установлюватися підземно або наземно [2-4]. До підземних відносяться резервуари, заглиблені в ґрунт або обсіпані ґрунтом, коли:

- найвищий рівень речовини, що зберігається в ньому, знаходиться не менше ніж на $0,2\text{м}$ нижче мінімальної планової мітки прилеглої площадки;
- обсіпання не менше ніж на $0,2\text{м}$ вище допустимого рівня ЕНР у резервуарі і шириною не менше 3м .

Наземними є резервуари, днище яких знаходиться на одному рівні або вище мінімальної планової мітки прилеглої площадки в межах 3м від стінки резервуара. На скельних породах, у районах з вічною мерзлотою, тощо практикується також установка резервуарів на пальових підставах.

Усі резервуари обладнуються дихальною арматурою/клапанами для вирівнювання тиску всередині резервуара з навколишнім середовищем при закачуванні або відкачці ЕНР, приймально-відпускними пристроями, а при необхідності, особливо при зберіганні нафти і темних нафтопродуктів, системами розмиву донних відкладень. На дахах резервуарів крім дихальної арматури/клапанів розміщуються також світлові та технологічні люки для проведення замірів і технічного обслуговування, а на плаваючих дахах,

крім того, пристрої для видалення атмосферних опадів через гнучкий шланг або шарнірну трубу і рухомі сходи. Резервуари для зберігання в'язких ЕНР часто обладнуються системами обігріву та покриваються теплоізоляційним негорючим матеріалом.

1.2. Фактори, які впливають на зміну технічного стану резервуарів

Технічний стан елементів конструкцій резервуарів і трубопроводів є характеристикою, що відображає їх здатність виконувати передбачені завдання в межах граничних умов, що характеризуються набором граничних станів за фізичними і хімічними характеристиками, до яких, в основному відносяться [5,6]:

- здатність резервуарів і трубопроводів відповідати своїм цільовим призначенням при вертикальних, горизонтальних і комбінованих навантаженнях, які в свою чергу поділяються на статичні і динамічні;
- здатність резервуарів і трубопроводів зберігати цілісність і незмінність положення в просторі при дії хімічних факторів (корозія).

До статичних і динамічних навантажень, що впливають на резервуари і трубопроводи, відносять: їх власну вагу, вагу додаткових механізмів і пристроїв, розміщених на них (в них), які формують вертикальні, горизонтальні і комбіновані навантаження, пов'язані з конструктивними особливостями.

Згідно з діючими нормами [7], проектування і розрахунок резервуарів для зберігання нафтопродуктів повинен забезпечувати виконання таких основних вимог:

- по забезпеченню несучої здатності – граничний стан першої групи;
- по придатності до нормальної експлуатації – граничний стан другої групи.

Граничним вважається стан, при якому резервуари перестають задовольняти пропонованим в процесі експлуатації вимогам, тобто втрачають здатність чинити опір зовнішнім навантаженням і впливам, або коли настають незворотні ушкодження.

Руйнування резервуарів та їх елементів відбувається як:

- пластичне руйнування, яке супроводжується значним розвитком пластичних деформацій при повторюваних навантаженнях за умови змінної плинності і прогресивного руйнування;

- крихке руйнування, яке супроводжується малою деформацією і виникає при концентрації зон напружень, низьких температурних або ударних впливах, а в більшості випадків при одночасній дії зазначених факторів;

- втомне руйнування, яке супроводжується утворенням і розвитком тріщин в результаті багаторазово повторюваних силових впливів від вібраційних та інших змінних навантажень, прикладених безпосередньо до резервуару.

Причини зниження несучої здатності резервуарів умовно розділяють на причини внутрішнього і зовнішнього характеру [2,3].

До причин внутрішнього характеру відносять якість проектування, виготовлення і монтажу, фізико-хімічні процеси, що протікають в матеріалах, навантаження і процеси, що виникають при експлуатації. Так, дефекти проектування пов'язані з нераціональними або помилковими конструктивними рішеннями, невідповідністю розрахункової схеми дійсним умовам роботи, відхиленнями від норм проектування та іншими причинами. Дефекти виготовлення визначаються відхиленнями від проектних геометричних розмірів, зниженням міцності і підвищенням проникності матеріалу в порівнянні з проектними, порушеннями армування, товщини захисного шару, наявності тріщин, раковин, каверн в зварних з'єднаннях. Дефекти монтажу і зведення проявляються у зсувах конструкцій від проектного положення, недостатній площі обпирання, низькій якості монтажних з'єднань, неякісному виконанні антикорозійного захисту, гідроізоляції та ін.

До причин зовнішнього характеру відносять кліматичні впливи (температуру, вологість, сонячну радіацію), фактори навколишнього середовища (вітер, пил, пісок, наявність в атмосфері агресивних сполучень, біологічні фактори), а також умови експлуатації.

Виконання вимог за граничним станом першої групи має захищати резервуари від:

- крихкого, в'язкого, втомного чи іншого характеру руйнування;
- втрати стійкості форми або її положення, переходу в змінюване положення;
- руйнування днища спільним впливом силових факторів і несприятливих впливів зовнішнього середовища.

Граничний стан другої групи характеризується тим, що порушуються умови нормальної експлуатації, пов'язані зі зберігання ЕНР та роботою

технологічного устаткування, обмеженням переміщень, зрушень у з'єднаннях, вібрацій і зміни положення резервуара в просторі.

На відміну від несучої здатності, коли критеріями граничних станів є силові фактори (або навантаження) і виконується перевірка зусиль або напружень, для повної непридатності до експлуатації граничні стани резервуарів по суті повинні оцінюватися деформаційними критеріями – обмеженням переміщень або деформацій їх елементів, що працюють за межею пружності.

Виконання вимог за граничним станом другої групи має захищати резервуар від:

- утворення тріщин;
- надмірних переміщень – прогинів, нахилів, вм'ятин, вібрацій.

Дефекти та пошкодження в елементах конструкцій РВС виникають як внаслідок технологічних та виробничих факторів, так і в процесі експлуатації під впливом неконтрольованих збурень техногенного та/або природного походження. Серед таких факторів можна виділити [2]:

- сейсмічні збурення місця встановлення резервуару;
- вітрові навантаження на резервуар;
- різкі зміни температури стінок резервуара при коливанні рівня ЕНР;
- корозія металу за різними механізмами, у тому числі корозійне розтріскування;
- втомні процеси в основному металі і в зварних з'єднаннях;
- наявність зон концентрації високих напружень після монтажних і зварювальних робіт;
- незадовільна якість зварних з'єднань (особливо монтажних) і металопрокату стінки;
- деформація опор і фундаментів;
- тривалий термін експлуатації без контролю ТС та ремонту.

Зазначені фактори в експлуатації можуть призвести до таких основних видів пошкоджень і дефектів, як:

- недопустима корозія металу;
- старіння металу;
- тріщини різної природи;
- розшарування основного металу;
- деформаційна зміна геометрії;
- локальна втрата стійкості металу.

Практика свідчить [8], що руйнування сталевих резервуарів для нафтопродуктів в більшості випадків виявляється у вигляді наскрізних тріщин, наскрізної корозії, втрати стійкості, а найнебезпечнішими місцями таких об'єктів є зварні шви, днища, місця кріплень. Як приклад, на рис. 1.1 - рис. 1.3 показано наслідки негативного впливу зовнішніх збурень на РВС [9]. Дія сейсмічних, вітрових навантажень та дефекти установки призвели до деформування стінки та обвалу даху (рис. 1.1). На рис. 1.2 зображено недопустиму корозію металу, а рис. 1.3 ілюструє, як під дією перепаду тиску деформувалися стінки РВС, що в подальшому може призвести до руйнування всієї конструкції.



Рис. 1.1. Деформування стінки та обвал даху



Рис. 1.2. Корозія резервуару



Рис. 1.3. Деформація стінки резервуару під дією перепаду тиску

На сучасному етапі проблеми зберігання ЕНР виходять за рамки національних кордонів і мають глобальний характер, так як деяка частина об'єктів знаходяться поза межами дії національної юрисдикції в тому числі в таких важкодоступних місцях як Світовий океан, Антарктика, тощо.

Прикладом такого об'єкта є РВС циліндричної форми для зберігання дизельного палива (рис. 1.4), який на початку 2007 року було встановлено та запущено в експлуатацію на українській антарктичній станції Академік Вернадський [9,10]. Резервуар об'ємом 200м^3 запроєктований двоштинним (наявність внутрішньої та зовнішньої захисної оболонок), з двома днищами і дахами.

Комплексний вплив динамічних та кліматичних навантажень, наявність зварних з'єднань елементів конструкції несе загрозу появи та розвитку багатоосередкового пошкодження та руйнування, що характеризується раптовим та швидкісним розповсюдженням за рахунок об'єднання між собою та поглинання невеликих за розміром тріщин. Для такого резервуару характерними особливостями є важкодоступність, критичні кліматичні умови, значні динамічні збурення у вигляді вітрових та сейсмічних навантажень.



а)

а) внутрішня ємність



б)

б) зовнішня (захисна) оболонка

Рис 1.4. Зварний резервуар на українській антарктичній станції Академік Вернадський

В [11] наведено причини виникнення пошкоджень і руйнувань резервуарів для зберігання нафтопродуктів, які не можуть бути враховані розрахунками на міцність і втому. До таких причин відносяться помилки на стадії проектування і виробництва, як експлуатаційні розглядаються фак-

тори, що пов'язані з порушеннями умов і режимів експлуатації, з наявністю зовнішніх не контрольованих впливів. До особливих причин відносяться стихійні лиха, аварії, техногенні катастрофи.

Для безаварійної та ефективної експлуатації таких об'єктів необхідно забезпечити своєчасне виявлення мікро дефектів на значних за розмірами поверхнях. Тому основним експлуатаційним фактором безпечного функціонування резервуарів з ЕНР є неперервний моніторинг структурної цілісності та напружено-деформованого стану елементів конструкцій, визначення їх поточного функціонального технічного стану, виявлення пошкоджень на якомога ранній стадії їх розвитку.

1.3. Діагностика резервуарів для попередження їх пошкоджень та руйнування

Для попередження пошкоджень та руйнування резервуарів з ЕНР, особливо тих, що знаходяться у важкодоступних місцях та в критичних умовах експлуатації, необхідно виробити новий підхід до його технічного обслуговування. На заміну системи планово-попереджувальних робіт, що включає в себе періодичний інструментальний та/або візуальний контроль елементів конструкції і профілактичний ремонт, більш доцільним стає обслуговування об'єктів за їх фактичним станом. Для цього традиційно використовуються методи і засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики, які за своїми характеристиками та умовами є прийнятними для конкретного технічного об'єкту.

1.3.1 Основні види технічної діагностики

Технічна діагностика – це галузь науково-технічних знань, що поєднує теорію, методи і засоби пошуку і виявлення дефектів технічних об'єктів та забезпечує [13]:

- 1) виявлення пошкоджень або дефектів на початковій стадії їх розвитку; виявлення конкретних дефектних вузлів, або деталей об'єктів;
- 2) визначення та усунення причин, що викликали дефекти;
- 3) оцінку допустимості і доцільності подальшої експлуатації об'єктів діагностики з врахуванням прогнозування їх технічного стану при виявлених дефектах; оптимізацію режимів експлуатації, що дозволяє безпечно

експлуатувати об'єкт з виявленими дефектами до моменту його виводу в плановий ремонт;

4) організацію обслуговування і ремонту технічних об'єктів за їх технічним станом.

У процесі діагностики людиною-оператором виконуються вимірвальні, контрольні та логічні операції за допомогою засобів діагностики для визначення дійсного стану конструкції [13]. Результати оцінки використовуються для прийняття рішення про необхідність проведення будь-яких робіт з технічного обслуговування.

Тестове діагностування передбачає оцінку ТС об'єкта за результатами аналізу отриманих від об'єкта відгуків на спеціально вироблені та подані на об'єкт тестові впливи [14,15]. У цьому випадку об'єкт, як правило, тимчасово виводиться з експлуатації. Функціональне діагностування проводиться під час експлуатації об'єкта, рішення про зміну його ТС здійснюється на основі вимірювання та аналізу множини діагностичних параметрів, якою описується множина його можливих станів [14,15].

Для функціональної діагностики важливими є аналіз об'єкта чи його моделей, аналіз статичних та динамічних навантажень, які призводять до появи пошкоджень, обґрунтування та вибір первинних перетворювачів системи діагностики, а також обґрунтування і вибір методів обробки діагностичної інформації.

Функціональна діагностика за звичай ґрунтується вимірюванні різних фізичних величин, які часто необхідно вимірювати одночасно, застосовуючи складну математичну обробку вихідної діагностичної інформації (обчислення спектральних характеристик, цифрову фільтрацію, статистичний аналіз, та ін.). Для цього до складу систем функціональної діагностики входять необхідні обчислювальні модулі [15].

1.3.2 Етапи функціональної діагностики

В загальному випадку об'єкт діагностування (ОД) є складною системою взаємодіючих елементів, які по-різному впливають на можливість виходу конструкції з режиму нормальної експлуатації. Тому на першому етапі при здійсненні функціональної діагностики важливо виділити ті конструктивні елементи ОД, які мають найбільший вплив на точність отриманих результатів. Для діагностики унікальних (не серійного виробництва) конструкцій об'єктів, до яких належать і резервуари з ЕНР, виявлення еле-

ментів, що обмежують їх ресурс, здійснюється за допомогою натурних випробувань або на основі аналізу математичної чи імітаційної моделі ОД.

На другому етапі необхідно вибрати діагностичні параметри, значення яких однозначно пов'язані з ТС одного або групи елементів конструкції. Ці діагностичні параметри характеризуються номінальними значеннями і полем допусків, залежністю номінальних значень від зовнішніх динамічних збурень, закономірностями зміни в залежності від часу експлуатації, необхідною точністю вимірювань та ін. [13-15]. Зв'язок діагностичних параметрів з ТС об'єкта або його структурними елементами, а також залежність параметрів від зазначених вище факторів знаходиться на основі спеціальних випробувань або аналізу математичних чи імітаційних моделей ОД.

За інформативністю параметри можна умовно розділити на дві групи: узагальнені та локальні. Узагальнені параметри несуть в собі велику кількість інформації і характеризують стан декількох елементів, а локальні – тільки одного елемента конструкції ОК. При визначенні набору діагностичних параметрів перевага надається параметрам, які мають прямий функціональний зв'язок з ТС елемента, що діагностується, та характеризуються великою інформативністю, доступністю і надійністю засобів вимірювань для кожного обраного параметра, а також найменшими трудомісткістю і вартістю вимірювань [14,15].

Наступним етапом є вибір, удосконалення або розробка нових методів і засобів функціональної діагностики. На сьогодні методи діагностики використовують практично всі відомі методи вимірювань фізичних величин та найбільш прийнятні для конкретного ОД методи неруйнівного контролю. До найбільш значущих [6,16] слід віднести методи вібраційної діагностики, контроль теплових полів, спектральний аналіз електричних струмів, хімічний аналіз технологічних рідин і відпрацьованих газів. Кожен з методів використовується для виявлення певних дефектів при дотриманні деяких умов. Для вирішення найбільш складних завдань доцільним є комплексне використання різних методів.

Для правильного вибору методів і засобів діагностики необхідні знання природи, характеру і причин виникнення дефектів, а вибір конкретної методики функціональної діагностики залежить від:

- структурного, функціонального і вібраційного стану ОД;
- контрольної придатності ОД;

- завдань діагностики: виявлення пошкоджень, критичних навантажень, зміни діагностичних параметрів.

1.3.3. Загальна характеристика методів неруйнівного контролю

Методи неруйнівного контролю (МНК), або дефектоскопія, – це узагальнююча назва методів контролю матеріалів (виробів), що використовуються для виявлення порушення суцільності або однорідності макроструктури, відхилень хімічного складу й інших цілей, які не потребують руйнування зразків матеріалу та/або виробу в цілому [17].

Основними вимогами до МНК є [18]:

- можливість здійснення контролю на всіх стадіях виготовлення, при експлуатації та при ремонті виробів;
- можливість контролю якості продукції за більшістю заданих параметрів;
- узгодженість часу, що витрачається на контроль, з часом роботи іншого технологічного обладнання;
- висока вірогідність результатів контролю;
- можливість механізації й автоматизації контролю технологічних процесів, а також керування ними з використанням сигналів, що видаються засобами контролю;
- висока надійність дефектоскопічної апаратури і можливість використання її в різних умовах;
- простота методик контролю, технічна доступність засобів контролю в умовах виробництва, ремонту й експлуатації.

Основними областями застосування є дефектоскопія особливо відповідальних деталей і пристроїв (атомні реактори, літальні апарати, підводні й надводні плавальні засоби, космічні кораблі й т.п.); дефектоскопія деталей і пристроїв тривалої експлуатації (портові спорудження, мости, крани, атомні електростанції, резервуари, штучні супутники Землі); безперервна дефектоскопія особливо відповідальних агрегатів і пристроїв (резервуари атомних, тепло- і електростанцій), контроль підземних вироблень; проведення досліджень структури матеріалів і дефектів у виробках з метою вдосконалення технології.

В залежності від покладеного в основу фізичного принципу всі МНК діляться на акустичні (ультразвукові); капілярні; магнітні (або магнітопошккові); оптичні (візуально-оптичні); радіаційні; радіохвильові; теплові;

контроль пошуку течі; електричні; електромагнітні, або вихрострумові (методи вихрових струмів) та вібраційні. Загальну характеристику методів наведемо відповідно до [2,17-19].

Акустичні методи засновані на реєстрації коливань, збуджуваних або виникаючих у контрольованому об'єкті. Їх застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (порушень суцільності, неоднорідності структури, міжкристалічній корозії, дефектів склейки, пайки, зварювання й т.п.) у деталях і виробах, виготовлених з різних матеріалів. Вони дозволяють контролювати геометричні параметри при односторонньому доступу до виробу, а також фізико-механічні властивості металів і металовиробів без їхнього руйнування. У наш час успішно застосовуються тіньовий, резонансний, луна-імпульсний, емісійний, велосиметричний, імпедансний методи і метод вільних коливань.

Капілярні методи засновані на капілярному проникненні крапель індикаторних рідин у порожнини поверхневих дефектів. При контролі цими методами на очищену поверхню деталі наносять проникаючу рідину, що заповнює порожнини поверхневих дефектів. Потім рідину видаляють, а частину, що залишилася в порожнинах дефектів, виявляють за допомогою проявника, що утворить індикаторний малюнок. Капілярні методи використовуються в польових, цехових і лабораторних умовах, у широкому діапазоні високих і низьких температур. Вони дозволяють виявляти термічні й шліфовочні тріщини, волосовини, закати та ін. у деталях з металів і неметалів простої і складної форми.

Магнітні методи контролю засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей контрольованих виробів. Дозволяють виявити дефекти типу несуцільності матеріалу (тріщини, волосовини, закати), а також визначити механічні характеристики феромагнітних сталей і чавунів за зміною їх магнітних характеристик.

Візуально-оптичні методи контролю використовують взаємодію світлового випромінювання з об'єктом контролю. За характером взаємодії розрізняють методи перейденого, відбитого, розсіяного й індукованого випромінювань (під останнім мається на увазі оптичне випромінювання предмета під дією зовнішнього впливу, наприклад, люмінесценцію). Інформативними параметрами цих методів є: амплітуда, фаза, ступінь поляризації, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт, геометрія переломлення або відбиття випромінювання. Оптичні методи

широко застосовують через велику різноманітність способів одержання первинної інформації про наявність зовнішніх дефектів не залежно від матеріалу контрольованого виробу.

Радіаційні методи контролю засновані на реєстрації й аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання. Використовується рентгенівське, гамма-випромінювання, потоки нейтрино тощо. Проходячи через товщу виробу, випромінювання що в нього проникають по-різному послабляються в дефектному й бездефектному перерізах і несуть інформацію про внутрішню будову речовини й наявність дефектів всередині виробу. Ці методи використовуються для контролю зварних і паяних швів, виливків, прокату та ін.

Радіохвильові методи засновані на реєстрації параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, що взаємодіють з ОК. Використовуються хвилі надвисокочастотного діапазону довжиною 1-100мм для контролю виробів з діелектриків (пластмаса, кераміка, скловолокно), магнітодіелектриків (ферити), напівпровідників, тонкостінних металевих об'єктів. Як для оптичних та акустичних методів, розрізняють методи пройденного, відбитого, розсіяного випромінювання та резонансний метод.

Теплові методи засновані на реєстрації змін теплових або температурних полів ОК, застосовуються для будь-яких матеріалів. Розрізняють пасивний (на об'єкти не впливають зовнішнім джерелом тепла) і активний (об'єкт нагрівають або охолоджують) методи. Вимірюваним інформативним параметром є температура або тепловий потік. При пасивному методі вимірюють температурне поле працюючого об'єкта, дефект визначається появою місць підвищеної (зниженої) температури. Таким методом визначають місця витоку теплоти в будинках; тріщини у двигунах і т.д. При контролі активним методом об'єкт нагрівають контактним або безконтактним методом і вимірюють температуру з тієї або іншої сторони об'єкта. Це дозволяє виявляти несутцільності (тріщини, пористість, сторонні включення) в об'єктах, зміни в структурі та фізико-механічних властивостях матеріалу зміною теплопровідності, теплоємності, коефіцієнту теплопередачі. Вимірювання температури або теплових потоків виконують контактним або безконтактним способом. Найбільш ефективний засіб безконтактного спостереження – скануючий тепловізор.

Методи контролю пошуку течі засновані на реєстрації індикаторних рідин і газів, що проникають у наскрізні дефекти ОК. Їх застосовують для контролю герметичності працюючих під тиском зварних ємностей, бало-

нів, трубопроводів, паливної й гідроапаратур, масляних систем силових установок і т.п.

Електричні методи засновані на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з ОК (власне електричний метод), або поля, що виникає в ОК у результаті зовнішнього впливу (термоелектричний або трибоелектричний методи). Первинними інформативними параметрами є електрична ємність або потенціал. Ємнісний метод використовується для контролю діелектричних або напівпровідникових матеріалів. За зміною провідності, зокрема її реактивної частини, контролюють хімічний склад пластмас, напівпровідників, наявність у них несутцільностей; вологість сипучих матеріалів й інші властивості. Для контролю провідників застосовують метод електричного потенціалу, в якому товщину провідного шару, наявність несутцільностей поблизу поверхонь провідника контролюють, вимірюючи падіння потенціалу на деякій ділянці. Термоелектричний метод застосовують для контролю хімічного складу матеріалу.

Різновидом електричного методу є метод електронної емісії, тобто вимірювання емісії іонів з поверхні виробу під впливом внутрішніх напружень. Цей метод використовується для визначення розтріскувань в емальованих покриттях, для сортування деталей, вимірювання товщини плівкових покриттів і визначення ступеня загартування виробу.

Електромагнітний метод (вихрових струмів) заснований на реєстрації змін взаємодії електромагнітного поля котушки з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться цією котушкою в ОК. Його застосовують для виявлення поверхневих дефектів магнітних і немагнітних деталей.

Вібраційна діагностика – це метод діагностування технічних систем і устаткування, який ґрунтується на аналізі параметрів вібрації [20-21], що генерується працюючим обладнанням або є вторинною вібрацією, яка зумовлена структурою досліджуваного об'єкта, чи є реакцією об'єкта на динамічні збурення. Вібраційна діагностика, як і інші методи технічної діагностики, призначена для виявлення несправностей і оцінювання технічного стану об'єктів. Інтенсивний розвиток методу в останні роки пов'язаний із здешевленням електронних обчислювальних засобів і розширенням можливостей аналізу вібраційних сигналів. Перевагами методу є можливість виявлення прихованих дефектів, малий час діагностування, виявлення несправностей на етапі їх зародження, відсутність необхідності розбирання обладнання, можливість автоматизації процесу діагностики. До недоліків

методу відносяться особливі вимоги до способу закріплення датчиків вібрації, залежність параметрів вібрації від великої кількості факторів, складність виділення інформативних складових вібраційного сигналу, залежність точності діагностування від числа згладжених параметрів.

1.3.4. Автоматизовані системи моніторингу та діагностики

На сьогоднішній день завдяки широкому спектру можливостей найбільш ефективними є автоматизовані системи моніторингу та функціональної технічної діагностики.

Діагностична система, чи діагностичний комплекс – це упорядкована сукупність технічного обладнання, програмного забезпечення та персоналу (в тих випадках коли система не є автоматичною), які визначають та контролюють параметри поточного технічного стану об'єкта діагностики [22, 23]. Великою перевагою діагностичного комплексу є його багатоканальність, яка дозволяє застосовувати різні методи та засоби неруйнівного контролю і діагностики, отримати надлишкову інформацію і підвищити вірогідність знаходження дефектів.

Технічними нормами встановлюються такі категорії небезпечних об'єктів, що оснащуються системами моніторингу [23]:

- об'єкти першої категорії, що займають ключові позиції в технологічному процесі та визначають його безпеку, раптова відмова яких може призвести до техногенної аварії (вибуху, пожежі) і/або істотному зниженню техніко-економічних показників;
- об'єкти другої категорії, що займають другорядні позиції в технологічному процесі, раптова відмова яких може привести до зниження безпеки і техніко-економічних показників виробництва;
- об'єкти третьої категорії, вирішують допоміжні завдання.

Наведемо загальну характеристику та принципи побудови автоматизованих систем моніторингу і діагностики на основі результатів проведених досліджень в [23,24].

Систем моніторингу і діагностики можна розділити на такі основні види: переносні системи; стендові системи; стаціонарні системи.

Основною характеристикою переносної системи моніторингу і діагностики, яка відрізняє її від інших, є необхідність операцій по підключенню первинних датчиків до переносних пристроїв вимірювання та аналізу, що виконується вручну перед кожним вимірюванням. За звичай, викорис-

тання переносних систем передбачає встановлення датчиків на об'єкті на час вимірювання, але у важкодоступних місцях датчики можуть встановлюватися стаціонарно, а лінії зв'язку виводяться в доступні для оператора місця. Перевага переносної системи полягає в можливості збільшувати кількість точок контролю до необхідного значення за рахунок збільшення інтервалів між вимірюваннями. Ці інтервали визначаються тривалістю довгострокового прогнозу і, за звичай, складають декілька днів або тижнів. Якщо переносні системи виконують тільки функції моніторингу, то такі системи виявляються малоефективними і їх слід замінювати на стаціонарні з можливістю вимірювати технічні параметри практично постійно.

Характерною особливістю стендової системи моніторингу і діагностики є множина датчиків, що встановлюється в усі необхідні точки контролю об'єкту на час вимірювання, і забезпечує послідовне (паралельне) вимірювання і аналіз діагностичних сигналів за визначеними оператором алгоритмами. Стендові системи найчастіше використовуються або на час випробувань об'єкта діагностики, наприклад, для його вихідного контролю, або для періодичного обстеження. В останньому випадку система моніторингу і діагностики є складовою частиною стенду, а діагностика виконується з побудовою еталону для групи однакових об'єктів діагностики.

Особливістю стаціонарної системи є її автоматичне функціонування, у тому числі планування вимірювань і їх проведення, аналіз сигналів і усі подальші операції моніторингу.

В [23] наведено узагальнену класифікацію систем моніторингу за такими критеріями:

1. За кількістю використаних МНК:

- комплексні системи, в яких використовують декілька МНК;
- спеціалізовані системи, в яких використовують один метод

2. За типом експертної системи:

- системи підтримки ухвалення рішень включають властивості діагностичних систем і видають рекомендації персоналу при виникненні аварійно небезпечних ситуацій;
- системи, що визначають технічний стан об'єкту і причини його зміни;
- системи індикації стану, що здійснюють тільки визначення технічного стану об'єкту (придатний/не придатний), без уточнень причини несправності.

3. За об'ємом несправностей, що виявляються:

- широкого класу, що виявляють несправності різних вузлів об'єкту;
 - вузького класу, що визначають несправності одного вузла об'єкту контролю.
4. За можливістю визначення прогностного стану:
- системи з функцією визначення прогностного стану;
 - системи, що не підтримують функцію визначення прогностного стану.
5. За числом вимірювальних каналів системи:
- багатоканальні;
 - одноканальні.
6. За способом опитування датчиків:
- універсальні (паралельно-послідовні);
 - паралельні системи, що здійснюють одночасне вимірювання сигналів і їх обробку;
 - послідовні системи, що здійснюють почергове вимірювання сигналів і їх обробку (в основному переносні системи).
7. За архітектурою:
- розподілені системи, апаратура яких розміщується безпосередньо на об'єкті контролю;
 - зосереджені системи, вся апаратура яких за винятком датчиків розміщується в одному місці, здебільшого віддаленому від об'єкту контролю.
8. За типом аналізатора сигналів, що використовується:
- векторні системи, видають інформацію у формі масивів та проводять математичну обробку діагностичних сигналів;
 - скалярні системи, вихідні дані яких у вигляді скалярних чисел.
9. За типом індикатору технічного стану:
- комплексні системи, що включають функції багаторівневих індикаторів і також відображають дати пуску/зупинки певних елементів об'єкту, прогноз залишкового ресурсу та при необхідності формують сигнали про небезпеку;
 - багаторівневі індикатори разом із відображенням технічного стану об'єкту, мають функції відображення стану і параметрів різних складових об'єкту;
 - прості індикатори стану, мають тільки функцію відображення даних.

10. За типом керування:

- автоматичні системи, виконують усі функції моніторингу автоматично, без участі людини-оператора;
- автоматизовані системи, основні функції моніторингу виконують автоматично, а допоміжні - під керуванням людини-оператора;
- ручні, більшість функцій моніторингу в таких системах виконується людиною-оператором.

Система моніторингу в будь-якому її виконанні повинна мати чотири основні підсистеми:

1. Вимірювальні датчики і засоби зв'язку;
2. Засоби аналізу сигналів;
3. Засоби зберігання даних і їх відображення;
4. Пакет програм для моніторингу (підсистема звернення до баз даних, відображення результатів аналізу, порівняння з порогами і так далі).

Загальна структура системи може вдосконалюватися і/або ускладнюватися відповідно до умов експлуатації об'єкта діагностики, класу його небезпечності та виду системи.

Системи моніторингу і діагностики ускладнюються і через вимоги до них, які найчастіше визначають:

- основні види аналізу і параметри контролю;
- динамічний і частотний діапазони вимірювання і аналізу;
- лінійність окремих операцій і параметрів системи;
- швидкість виконання аналізу, час опитування датчиків (особливо в багатоканальних комплексних системах) і прийняття рішень;
- кількість паралельних каналів вимірювання і аналізу;
- завадозахищеність, надійність, ресурс та ремонтпридатність.

Як приклад, системи моніторингу об'єктів першої категорії небезпечності повинні задовольняти таким вимогам [23]:

1. При розробці системи моніторингу мають бути передбачені способи установки датчиків, що не порушують умов безпечного та правильного функціонування устаткування в існуючому технологічному процесі.

2. Конструкція складових частин системи моніторингу повинна забезпечувати механічну міцність і дотримання норм на електричні параметри, встановлені в технічних умовах на систему з урахуванням її експлуатації в заданих кліматичних районах і заданих вибухонебезпечних зонах.

3. Термін служби системи моніторингу має бути не менше 10 років. Має бути забезпечена можливість безперервної цілодобової роботи системи моніторингу протягом міжремонтного періоду. Допускається короточасне вимкнення системи моніторингу для її обслуговування та ремонту, тривалість якого не повинна перевищувати інтервалу прогнозу небезпечного стану, відповідного заданому ризику пропуску відмови.

4. Підтвердження (перевірка) вірогідності помилки розпізнавання та ризику пропуску раптової відмови здійснюють спеціалізовані лабораторії при випробуваннях системи в умовах, близьких до експлуатаційних або під час дослідної експлуатації у виробничих умовах.

5. Система моніторингу повинна автоматично визначати та прогнозувати несправність контролюваного об'єкту і видавати рекомендації персоналу щодо його дій.

6. Система моніторингу повинна автоматично архівувати результати вимірювань і відображати графіки зміни параметрів технічного стану в часі (тренди).

7. Система моніторингу повинна зберігати тренди і сигнали при появі встановлених подій (неприпустимого стану контролюваного об'єкту).

8. Система моніторингу повинна мати наступні форми представлення результуючої інформації: графічний інтерфейс; звукове попередження; протоколи звітів із можливістю друку на принтері.

9. Система моніторингу повинна відображати одночасно мінімум два тренди будь-яких вибраних із числа контрольованих параметрів з наступними рекомендованими інтервалами часу для різних періодів моніторингу (звернення оператора):

- для періоду 12 години інтервал складає 1,5 хвилини;
- для періоду 4 доби години інтервал складає 12 хвилин;
- для періоду 40 діб інтервал складає 2 години;
- для періоду 1 рік інтервал складає 1 добу;
- для періоду 9 років інтервал складає 7 діб.

До основних принципів побудови автоматичних та автоматизованих систем моніторингу та діагностики можна віднести [24] наступні:

1. Системи моніторингу повинні забезпечувати отримання інформації про стан об'єкту моніторингу у необхідній кількості і якості для забезпечення контролю його технічного стану; за результатами спостереження системи повинні завчасно виробляти керуючі дії, які забезпечують необ-

хідний запас стійкості об'єкту, якість його функціонування, створюють необхідний запас його техногенної, екологічної і економічної безпеки.

2. Принцип достатності регламентує вибір мінімального числа датчиків інформації, що забезпечують контроль технічного стану. При цьому вихідний сигнал датчиків може бути представлений в широкому діапазоні амплітуд і частот з наступною його обробкою (виявленням, фільтрацією, лінеаризацією, корекцією амплітудно-фазових характеристик та ін.).

3. Принцип інформаційної повноти в загальному вигляді може бути сформульований так, що окрім відомих нам діагностичних ознак, що описують технічний стан об'єкту відомим чином, із спектрів сигналів після видалення відомих ознак виділяють «залишковий шум», характеристики якого також використовують для діагностики; за досить загальних умов така система ознак майже ортогональна, тобто кожна з ознак відбиває свій клас несправностей.

4. Принцип інваріантності регламентує вибір і селекцію інваріантних діагностичних ознак, що забезпечує застосування стандартних процедур без еталонної діагностики.

5. Принцип самодіагностики усіх вимірювальних та керуючих каналів системи реалізується подачею спеціальних стимулюючих сигналів в ланцюг датчика з подальшим аналізом цього сигналу на виході системи. Реалізація цього принципу забезпечує простоту обслуговування і ремонту окремих каналів, високу метрологічну і функціональну надійність системи, її живучість і пристосованість до зміни умов і режимів функціонування об'єкту моніторингу.

6. Принцип структурної гнучкості і програмованості забезпечує реалізацію оптимальної паралельно-послідовної структури системи, виходячи з критеріїв необхідної швидкодії при мінімальній вартості. Вибір структури системи (міри паралельності) вимагає оцінки її необхідної швидкодії, що визначається швидкістю деградації технічного стану об'єкту діагностики.

7. Принцип корекції не ідеальності вимірювальних трактів обчислювальними методами (нелінійності датчиків, амплітудно-фазових характеристик та ін.) забезпечує високу точність і стабільність метрологічних характеристик системи моніторингу.

На сьогоднішній день за наведеними принципами створено та впроваджено системи моніторингу та функціональної діагностики в найрізноманітніших сферах промисловості, у тому числі для контролю резервуарів

для зберігання ЕНР. Розвиток цих систем відбувається постійно, наприклад, за рахунок удосконалення первинних перетворювачів, які входять у склад будь-якої системи; впровадження технологій бездротового живлення та передачі даних; використання нових підходів до обробки та відображення діагностичної інформації; використання сучасних інформаційних технологій та інтелектуалізація процесів прийняття рішення і прогнозування ТС об'єкта, тощо.

1.4. Системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring

Комплексні інтелектуальні системи моніторингу ТС об'єктів критичної інфраструктури за принципами побудови та функціонування реалізують концепцію структурного моніторингу Structural Health Monitoring (SHM) [3, 25-29]. Концепція SHM зараз активно розвивається закордоном і передбачає неперервний та автономний контроль дефектів та пошкоджень, статичних та динамічних навантажень, взаємодії елементів конструкцій з навколишнім середовищем. Це відбувається за допомогою мережі постійно прикріплених чи вбудованих чутливих елементів (сенсорів), що забезпечують цілісність конструкції об'єкту. Для динамічних об'єктів структурний моніторинг (визначення стану елементів конструкцій в експлуатації) доповнюється системним моніторингом (визначення ТС функціональних систем в експлуатації). Таким чином, системи SHM забезпечують моніторинг життєвого циклу контрольованого об'єкту для його надійної та безпечної експлуатації.

У відповідності до концепції SHM структурний та системний моніторинг є науковим процесом неруйнівної ідентифікації чотирьох характеристик, які пов'язані з відповідністю розроблених елементів конструкцій об'єктів контролю встановленим вимогам при їх експлуатації:

- експлуатаційні та кліматичні навантаження на елементи конструкції;
- механічні пошкодження, зумовлені зазначеними навантаженнями;
- розвиток пошкоджень при експлуатації елементів конструкцій;
- прогнозовані експлуатаційні характеристики елементів конструкцій при накопиченні пошкоджень.

Таким чином, моніторинг визначається як єдиний інформаційний процес отримання, перетворення та аналізу доступної в процесі експлуатації інформації для прийняття рішення щодо ТС елементів конструкцій

об'єктів контролю. Інформація про перші три характеристики, що отримана як на основі попереднього аналізу математичних моделей, конструкції, особливостей та технічних умов функціонування об'єктів контролю, так і в результаті неруйнівної ідентифікації в процесі експлуатації, використовується для прогнозування зміни (відповідності чи не відповідності) ТС об'єкту в майбутньому.

Системи SHM розробляються як розгалужені інформаційні мережі, які подібні до нервової системи людини [30]. Для реєстрації експлуатаційного навантаження та виникнення дефектів в елементах конструкції як чутливі елементи використовуються сенсори, побудовані на різних фізичних принципах. Впровадження концепції SHM при розробці нових об'єктів авіаційної техніки, машинобудування, енергетики, нафтогазової галузі, інженерних споруд спеціального призначення дозволяє створювати «інтелектуальні конструкції». З цією метою, наприклад, в авіабудуванні в 2007 році було створене Міжнародне аерокосмічне об'єднання SHM-AISC (Aerospace Industry Steering Committee) для координації робіт по розробці та впровадженню автоматизованих бортових систем контролю цілісності конструкції літаків та багаторазових космічних апаратів [30]. Розробка систем SHM є важливою та актуальною проблемою в усіх найбільш технічно розвинутих країнах світу, ця проблема досліджується і в наукових публікаціях в Україні [31-33].

Як показано в [29, 30], атрибутами ефективної структури системи SHM є:

- можливість імовірнісного виявлення пошкодження в режимі реального часу (за запитом або безперервним моніторингом стану);
- бездротова передача даних від первинних перетворювачів на центральну станцію та їх миттєва інтерпретація;
- прогноз зростання дефекту за імовірнісною процедурою;
- встановлення імовірної прогнозованої оцінки стану пошкодження на найближчий термін;
- коригування прогнозу росту фактичного пошкодження через встановлені проміжки часу.

В основу синтезу таких систем покладено оптимальне об'єднання принципів модульності та багатоканальності з урахуванням інформаційних аспектів діагностичних процесів. Модульний принцип віддзеркалює набір використаних сенсорів для отримання інформації, достатньої для комплексної оцінки експлуатаційного навантаження та поточного ТС од-

нієї чи декількох структурних одиниць контрольованого об'єкту. Принцип багатоканальності при створенні систем SHM реалізується як в межах одного модуля (при реалізації одного фізичного принципу та методу контролю), так і за рахунок об'єднання декількох модулів для вирішення діагностичної задачі щодо однієї структурної одиниці об'єкту.

Для отримання діагностичної інформації в системах SHM використовується множина сенсорів, побудованих на різних фізичних принципах, які об'єднані в єдину мережу і інтегровані з керуючим і обчислювальним модулем. В роботі [29] на основі огляду закордонних літературних джерел наведено перелік сучасних сенсорів, які можуть бути використані в системах SHM різних об'єктів авіаційної техніки, ракетно-космічної техніки, цивільної інфраструктури. Зазначено, що особливості функціонування об'єктів моніторингу накладають специфічні вимоги, у відповідності до яких сенсори повинні:

- витримувати вплив зовнішнього середовища;
- бути здатними контролювати визначені площі конструкцій, локалізуючи проблемну ділянку;
- надавати діагностичні дані, маючи мінімальний розмір, вагу та споживану потужність.

Вибір типу сенсорів, їх кількість, розташування на об'єкті є окремим важливим завданням при розробці системи моніторингу, для розв'язання якого необхідно враховувати описані в [29] вимоги:

– сенсори, що постійно встановлені в конструкції, не повинні втрачати зв'язок з діагностичною системою, коли конструкція виходить з ладу, їх необхідно періодично контролювати з використанням окремого блоку для отримання інформації про стан об'єкту;

– використовувати сенсори з можливістю реєстрації даних під час експлуатації об'єкту та періодичного завантаження інформації до записуючого блоку в інших режимах;

– забезпечення можливості здійснювати передачу даних на віддалений сайт в режимі реального часу для здійснення моніторингу у режимі реального часу під час експлуатації.

Методи обробки обираються окремо для кожного модуля в залежності від інформативності тих фізичних величин чи їх характеристик, що використовуються в якості діагностичної інформації. Зокрема, в [27,28] рекомендують використання таких методів:

- фільтрація сигналів у часовому, частотному та просторовому поданнях;
- часовий аналіз даних: детерміністичний, статистичний;
- спектральний аналіз, який ґрунтується на різновидах перетворення Фур'є;
- білінійні частотно-часові перетворення Вінгера, Маргінау-Хіла, Чої-Вільямса, Борне-Жордана;
- методи на основі використання статистичних та спектральних характеристик вищих порядків;
- кепстральний аналіз, який є різновидом нелінійної обробки сигналів у частотній області;
- кореляційний аналіз;
- усереднення даних;
- масштабно-часові перетворення (наприклад, вейвлет-аналіз);
- методи апроксимації даних та оцінювання параметрів;
- методи фрактального аналізу.

Визначення ТС об'єкта проводиться, за звичай, в умовах обмеженої інформації, що може призвести до помилок при постановці діагнозу. Для попередження фатальних помилок необхідно мати чіткі алгоритми і правила прийняття рішення, які враховують як неминучість помилкових рішень, так і тяжкість їх наслідків.

Подальший розвиток систем моніторингу передбачає вирішення таких завдань [27-29,33]:

- підвищення надійності та вірогідності визначення ТС об'єктів під час їх експлуатації;
- використання комплексного підходу при розробці систем SHM для об'єктів широкого кола застосування, заснованих на різних матеріалах, геометрії компонентів і сценаріях пошкодження;
- підвищення надійності і вірогідності виявлення дефектів на якомогаранній стадії їх розвитку протягом встановленого терміну експлуатації об'єктів;
- моніторинг умов оточуючого середовища, підвищення надійності визначення зовнішніх впливів на об'єкти для їх захисту та попередження перевищення навантаженнями допустимих значень;
- застосування інтелектуальних технологій на різних етапах процесу моніторингу: інтелектуальні сенсори; перетворення та передача діагностичної інформації; інтелектуальний аналіз великих масивів діаг-

ностичної інформації з метою визначення інформативних параметрів для оцінки поточного стану; системи прийняття рішення на основі технологій штучного інтелекту; системи прогнозування майбутніх станів об'єкта;

2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СТІЙКОСТІ МОДЕЛІ РЕЗЕРВУАРУ ДЛЯ РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1. Розробка діагностичної моделі бездефектного резервуару

Для розробки системи структурного моніторингу резервуарів з ЕНР важливим етапом є теоретичне обґрунтування та вибір діагностичних методів, застосування яких забезпечить визначення поточного технічного стану об'єкта діагностики в реальних умовах експлуатації. Першочерговим завданням для такого обґрунтування є розробка діагностичної моделі об'єкта з метою визначення залежностей параметрів, що характеризують ТС об'єкта, від множини параметрів дефектів чи пошкоджень, що з'являються та поширюються в елементах конструкції об'єкта під час експлуатації. Головною вимогою, якій повинні задовольняти діагностичні моделі об'єктів, є можливість опису найбільш суттєвих для встановлення діагнозу властивостей та конструктивних і функціональних особливостей об'єктів, які дозволяють визначити параметри їх технічних станів [13,20,24].

Діагностичні моделі розрізняються за рівнем абстрактності, коли з розгляду вилучаються деякі важливі для функціонування, але другорядні чи не суттєві для постановки діагнозу, характерні особливості об'єктів. Для побудови діагностичних моделей необхідно узагальнити інформацію про об'єкт, умови та режими його експлуатації, дослідити вплив навантажень на елементи конструкції, розкрити механізми зародження та поширення можливих дефектів чи пошкоджень, визначити основні діагностичні завдання, розв'язання яких забезпечує визначення ТС об'єкту.

2.1.1. Загальна характеристика резервуару як об'єкта діагностики

У якості об'єкта діагностики розглядаємо вертикальний сталевий резервуар, наприклад, такий, який встановлено на українській антарктичній станції Академік Вернадський для зберігання пального [2,24,34]. Резервуар експлуатується в умовах:

- вітрового навантаження до 45 м/с;
- вологості до 100%;
- перепаду температур від $+10^{\circ}\text{C}$ до -50°C ;
- снігового навантаження до 2 м;
- утворення водного конденсату в просторі між стінками резервуара;
- наявності помірних землетрусів в районі станції.

Резервуар об'ємом 200 м^3 запроектований двохстінним, він складається з двох зварних циліндрів – внутрішнього резервуару, в якому зберігається пальне, та зовнішнього захисного резервуару, має два днища і дві покрівлі. Висота внутрішнього резервуару становить 5,96 м, а захисного зовнішнього – 6,58 м. Діаметр внутрішнього резервуару становить 6,63 м, а захисного зовнішнього – 6,96 м. Відстань між стінками зовнішньої та внутрішньої ємностей становить 0,16 м. Покрівля резервуарів має товщину 0,004 м, днище внутрішньої ємності має товщину 0,005 м, а зовнішньої – 0,008 м.

Стінки оболонок є зварними з листів прокату товщиною 0,005 мм по всій висоті резервуару. Сталеві труби для закачування та відбору пального мають діаметр 3 дюйма та довжину 0,16 м. Оболонки виготовлені з матеріалу СтЗпс.2 (ГОСТ 14637), фізичні характеристики матеріалу для сталевих конструкцій згідно [35] приймаються такими: густина прокату – 7850 кг/м^3 ; коефіцієнт лінійного розширення – $0,12 \cdot 10^{-4}$; модуль пружності – $2,06 \cdot 10^5\text{ Н/мм}^2$, модуль зсуву – $0,79 \cdot 10^5\text{ Н/мм}^2$; коефіцієнт поперечної деформації – 0,3.

2.1.2. Побудова скінчено-елементної моделі резервуару

В інженерній практиці для вирішення задач міцності та коливань різноманітних об'єктів використовується метод скінчених елементів (МСЕ), який характеризується універсальністю, широким колом задач застосування, простотою алгоритмізації.

Суть МСЕ полягає в наступному [36]:

- досліджуваний об'єкт (тіло) розбивається уявними лініями чи поверхнями на велику кількість скінчених елементів (СЕ) простої форми (квадрати, трикутники, прямокутники, піраміди, призми, куби, паралелепіпеди, тощо), розміри яких є значно меншими за розміри досліджуваного тіла;
- переміщення в будь-якій довільній точці скінченого елемента однозначно визначається через переміщення в його вершинах (вузлових точ-

ках) за допомогою функції переміщення (лінійної, параболическої, та ін.). Вказана функція вибирається таким чином, щоб забезпечити необхідну точність апроксимації переміщень та напружень всередині елемента;

- задане за допомогою функцій поле переміщень всередині елемента дозволяє виразити деформації та напруження всередині елемента через вузлові переміщення. Наприклад, у випадку лінійної функції переміщень деформації та напруження всередині елемента будуть сталими;
- таким чином, задача розв'язання диференціальних рівнянь в частинних похідних зводиться до задачі розв'язання алгебраїчних рівнянь та визначення переміщень у вузлових точках. Ця процедура переходу від невідомих функцій до невідомих їх значень в окремих вузлових точках називається процедурою дискретизації, коли замість функцій нескінченного аргументу розглядаються визначені у вузлах сітки функції дискретного аргументу, а диференціальні рівняння замінюються різницевими;
- переміщення у вузлах визначаються з умов рівноваги системи скінченних елементів під дією приведених до вузлів зовнішніх сил;
- за знайденими вузовими переміщеннями визначаються поля напружень та деформацій в елементах та досліджуваному тілі.

Якщо у якості функції переміщень використовується поліном другого порядку, то СЕ будуть елементами другого порядку і будуть мати додаткові вузли посередині сторін. Їх використання призводить до більш складних співвідношень, але для однієї і тієї ж кількості елементів значно підвищується точність розрахунків.

На основі методу скінченних елементів із застосуванням програмного комплексу NASTRAN [37] побудована математична модель складеної конструкції у вигляді системи двох з'єднаних циліндричних оболонок з наведеними вище геометричними та механічними характеристиками. Скінченно-елементна модель конструкції будується в циліндричній системі координат. Стінки двох оболонок моделюються у вигляді поясів, які складаються з поверхонь (тіл), розміри яких відповідають листам прокату. Кожна поверхня представляється сукупністю чотирьохкутних плоских скінченних елементів зі шістьма степенями вільності. Вводиться припущення до зварних швів: механічні характеристики приймаються такими як у сталі Ст3пс2, тому не вводяться додаткові елементи, які би моделювали шви. Згідно рекомендацій програмного комплексу NASTRAN [37] наявність швів забезпечується моде-

люванням стінок у вигляді поверхонь (тіл). По колу внутрішня оболонка розбита на 90 частин, по висоті – на 20; зовнішня: по колу – на 72 частини, по висоті – на 22. Дві труби, що з'єднують оболонки, моделюються двома стержневими елементами типу Tube. В місцях кріплення патрубків до внутрішнього резервуару два чотирьохкутні елемента замінені на 8 трикутних плоских елементів. Кількість двомірних елементів всієї моделі складає 3548, кількість вузлів – 3392. Граничні умови приймаються згідно з [38]: у вузлах нижньої кромки внутрішнього резервуару обмежені поступальні переміщення по радіусу, обертальні переміщення – навколо радіуса і дотичної. Вузли нижньої кромки зовнішнього резервуару жорстко закріплені. На вузли верхніх кромок двох оболонок введені обмеження по радіусу та твірній (моделювання обмеження руху покрівлями резервуарів). Розроблені моделі зовнішньої ємності, внутрішньої ємності та системи двох з'єднаних оболонок наведено на рис. 2.1.

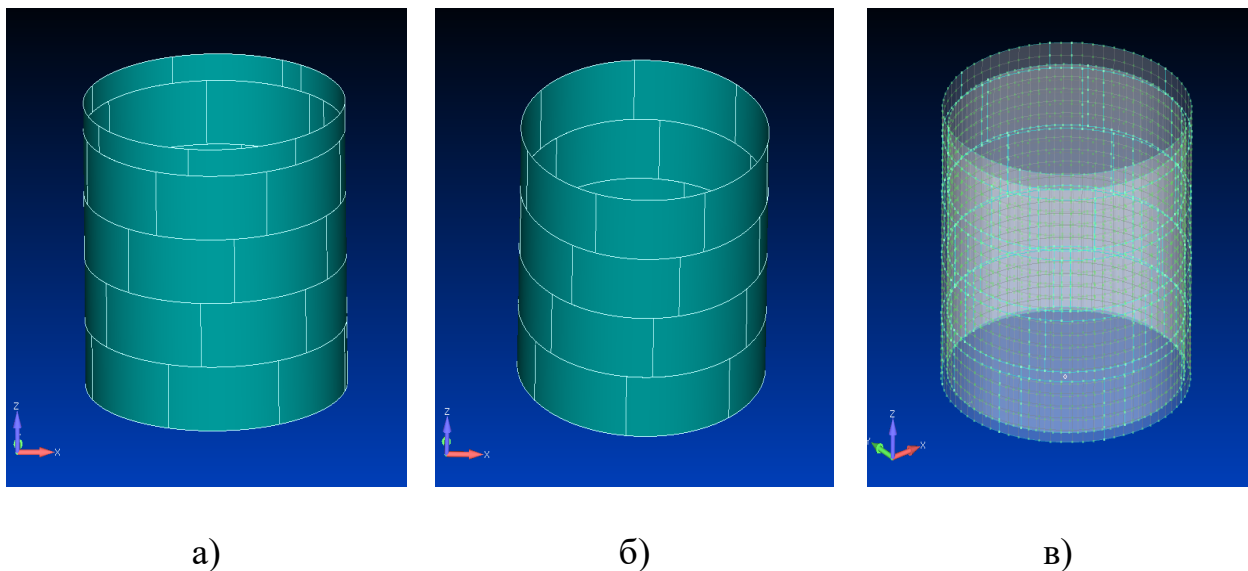


Рис. 2.1. Модель конструкції зовнішньої оболонки (а), внутрішньої оболонки (б), системи двох з'єднаних оболонок

2.2. Дослідження напружено-деформованого стану конструкції при дії статичних навантажень

Згідно нормативних документів [35], будівельні конструкції необхідно розраховувати за методом граничних станів, основні положення якого направлені на забезпечення надійності та безвідмовної роботи конструкції в процесі будівництва та експлуатації. Надійність конструкції забезпечується тоді,

коли розрахункові зусилля, напруження, деформації і переміщення не перевищують відповідні граничні значення, які встановлені нормами проектування конструкцій.

Для моделі бездефектного резервуару досліджується несуча здатність системи двох з'єднаних оболонок при дії статичних навантажень механічної природи, які призводять до її зниження. До таких навантажень відносяться постійні (вага елементів конструкцій), змінні тривалі навантаження (вага палива, температура, сніг). Згідно пункту 4.7 нормативного документа [12] основою для призначення навантажень є їхні характеристичні значення. При розрахунку конструкції визначаються розрахункові значення навантажень множенням характеристичних значень навантажень на коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f , який залежить від виду навантаження, та коефіцієнт надійності за відповідальністю γ_n за ГОСТ 27751. Вид розрахункових навантажень залежить від групи, до якої відноситься паливний резервуар разом із захисною ємністю. Група визначається відповідно до положень нормативного документа [35]. За табл. В.1 визначаємо класифікацію нашої конструкції: за призначенням – А, за напруженим станом – II. За табл. В.2 визначаємо показники груп конструкцій: клас відповідності $S1=0$; категорія за призначенням $S2=11$; категорія за напруженим станом $S3=5$; наявність розтягуючих напружень від розрахункових навантажень $S4=7$; несприятливий вплив зварних з'єднань $S5=6$. Конструкція паливного резервуару разом з захисною ємністю за сумою показників груп $S=S1+S2+S3+S4+S5=29>26$ відноситься до першої групи конструкцій, коефіцієнт відповідальності якої дорівнює 1,2. З урахуванням мети досліджень та групи конструкції в розрахунках приймаються граничні розрахункові навантаження.

Міцність конструкції перевіряється згідно рекомендацій нормативного документа [35] з врахуванням характеристичного опору сталі Ст3пс2 за границею текучості $R_T=245$ МПа, коефіцієнта надійності за матеріалом 1,05 та коефіцієнта умов роботи, який складає 0,7 для першого поясу та 0,8 для інших поясів. Граничне значення розрахункового опору сталі Ст3пс2 дорівнює $R_y=245 \cdot 0,7(0,8)/1,05=163(187)$ МПа, яке в розрахунках приймається за допустиме напруження в елементах конструкції, при якому гарантується міцність конструкції. Забезпечення міцності оцінюється за допомогою коефіцієнта запасу міцності, який показує у скільки разів допустиме напруження перевищує максимальне розрахункове напруження.

Згідно [35] для листових конструкцій зі зварними швами несприятливими умовами є від'ємні температури середовища, які сприяють виникненню крихкості сталі при перевищенні нормативних допустимих значень. Для сталі СтЗпс2 з урахуванням першої групи конструкції нормативна допустима від'ємна температура не повинна перевищувати -30°C (в дійсності, максимальна від'ємна температура на станції складає -38°C). Крихке руйнування вертикальних сталевих зварних резервуарів пов'язано з внутрішніми напруженнями розтягу в області зварних швів. Аналіз аварій показав, що крихкі тріщини виникають в перехрестях зварних монтажних швів першого і другого поясів. Тому додатково необхідно перевіряти значення напружень розтягу (мембранних) в елементах, що розташовані біля зварних швів, на умову не перевищення напружень у $0,3R_y$ [35]: для першого поясу оболонок – $48,9\text{ МПа}$, для інших поясів – $56,1\text{ МПа}$.

Для оцінки забезпечення стійкості конструкції використовується коефіцієнт запасу стійкості, який показує у скільки разів критичне навантаження, отримане при втраті стійкості конструкції, перевищує граничне розрахункове навантаження і повинен бути більшим за одиницю [35].

2.2.1. Статичний розрахунок при дії навантаження від ваги пального

Навантаження від ваги пального в резервуарі згідно [12] відноситься до змінних тривалих навантажень. Воно моделюється у вигляді розподіленого за трикутником бокового тиску на внутрішню поверхню паливного резервуара з урахуванням питомої ваги пального у 1000 кг/м^3 . Максимальне характеристичне значення навантаження від ваги пального складає $1000 \cdot 9,832 \cdot 5,96 = 58545,08\text{ Па}$. При визначенні граничного розрахункового навантаження враховується коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_f = 1,0$ та коефіцієнт відповідальності конструкції $\gamma_n = 1,2$. Максимальне граничне розрахункове значення навантаження від ваги пального при повному заповненні паливного резервуару дорівнює $58545,08 \cdot 1,0 \cdot 1,2 = 70257,7\text{ Па}$.

Для визначення напружено-деформованого стану конструкції застосовується процедура розв'язання нелінійної задачі статички Nonlinear Static програмного комплексу NASTRAN [37] за допомогою модифікованого методу Ньютона-Рафсона. Напружено-деформований стан (НДС) системи двох з'єднаних циліндричних оболонок досліджується при заповненні 4/4, 3/4, 1/2

та 1/4 частини об'єму паливного резервуару. В результаті розрахунку отримано ізополя переміщень вузлів конструкції (м), поперечних сил (Н/м), мембранних зусиль (розтягу) (Н/м), згинальних моментів (Нм) та еквівалентних напружень в елементах конструкції (Па). Визначені коефіцієнти запасу міцності конструкції з урахуванням граничного значення розрахункового опору сталі, яке є допустимим напруженням $R_y=163$ МПа для першого поясу і $R_y=187$ МПа для інших поясів резервуарів. Перевірено наявність несприятливих умов експлуатації конструкції при низьких температурних режимах: розрахункові значення мембранних напружень (розтягу) в місцях зварних швів повинні не перевищувати $0,3R_y$: для першого поясу $0,3 \cdot 163 = 48,9$ МПа, для інших поясів $0,3 \cdot 187 = 56,1$ МПа.

Форми деформування конструкції при різному рівні заповнення резервуару наведено на рис. 2.2.

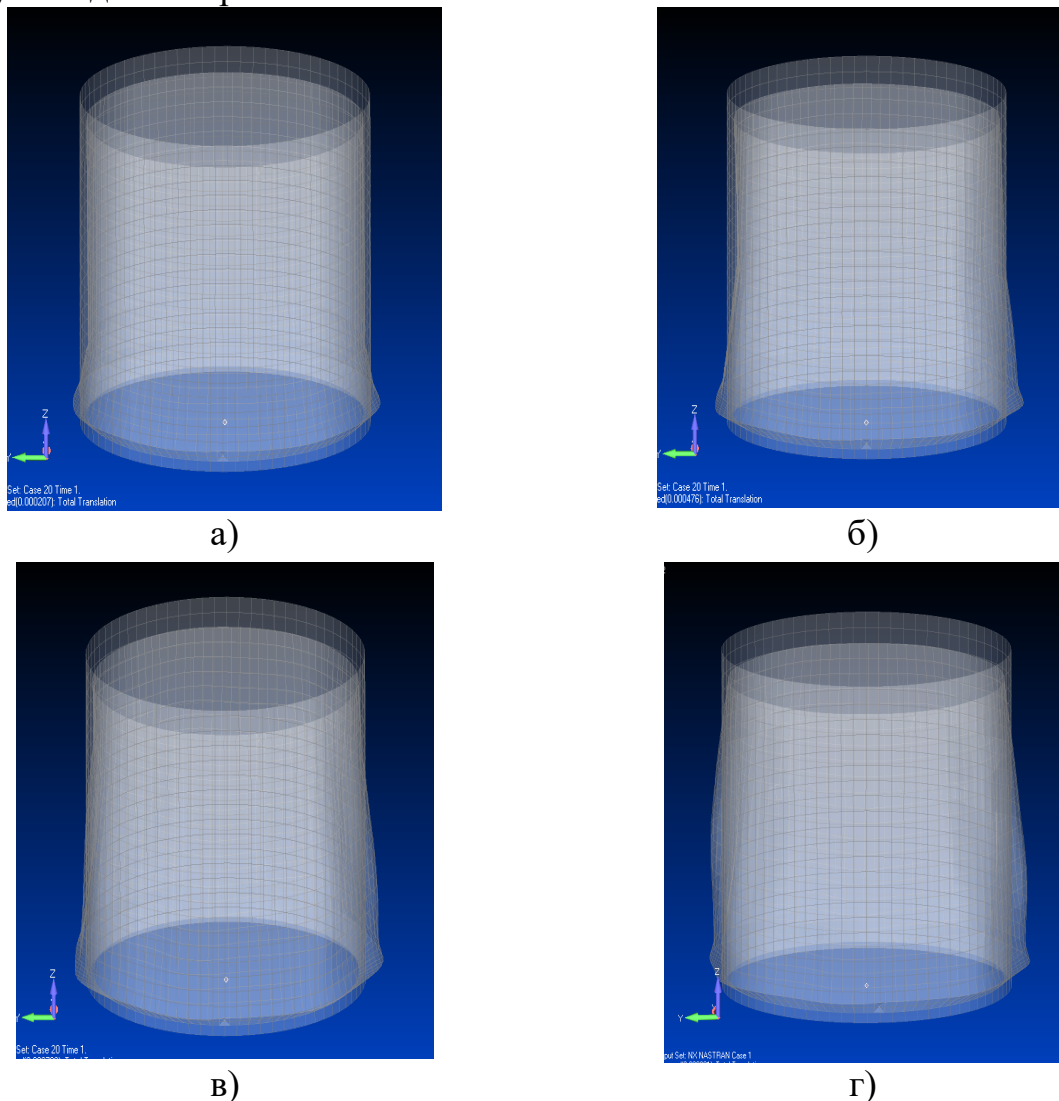


Рис. 2.2. Форми деформування конструкції при рівні заповнення резервуару:
а)1/4; б)1/2; в)3/4; г)4/4

У якості прикладу на рис. 2.3 наведено результати дослідження напружено-деформованого стану внутрішньої ємності резервуару при повному заповненні [39]. Результати, що ілюструють зміну параметрів напружено-деформованого стану внутрішньої і зовнішньої ємностей від рівня заповнення резервуару паливом (всього 56 рисунків) у повному обсязі наведено в [24].

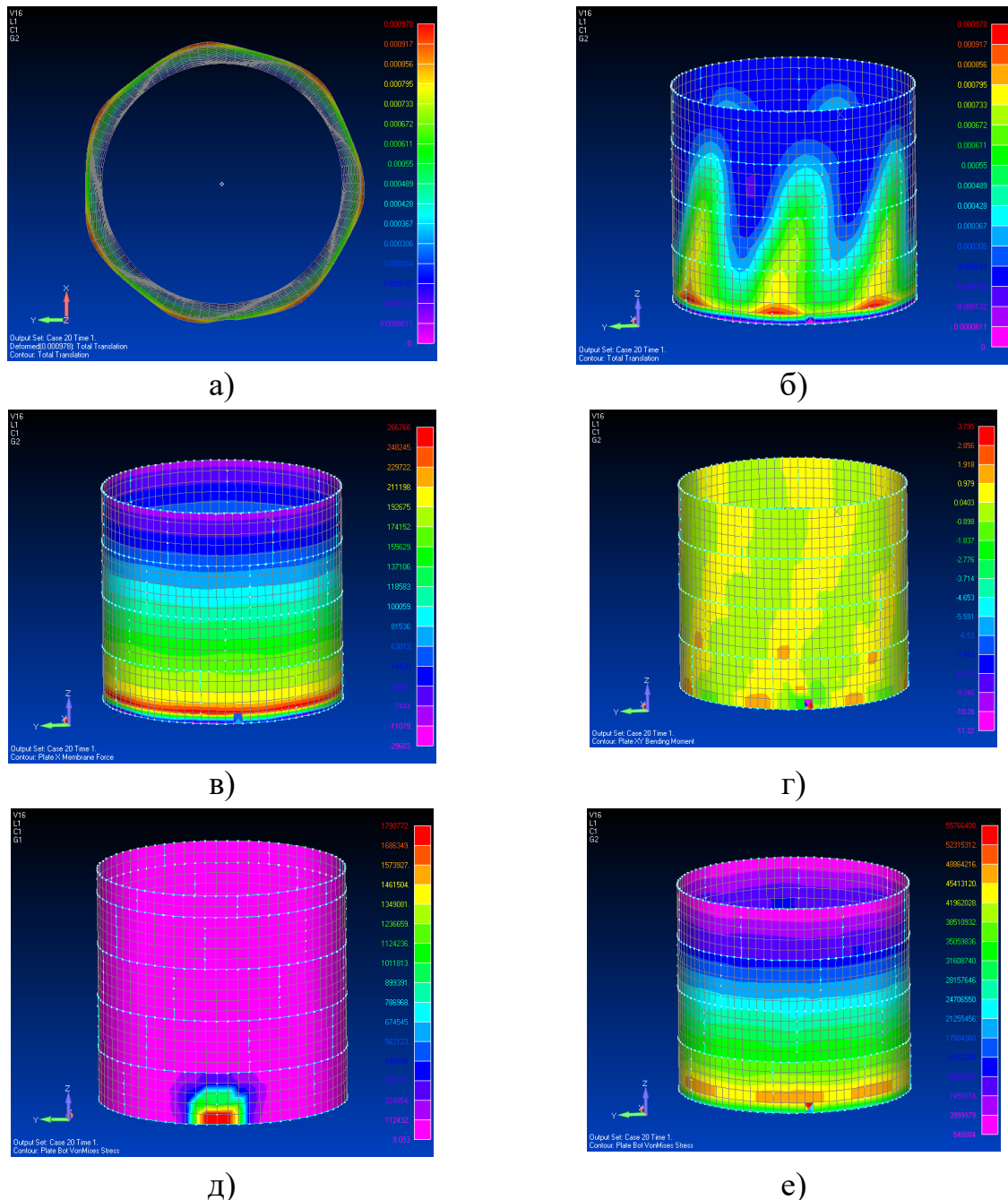


Рис. 2.3. Результати дослідження напружено-деформованого стану внутрішньої ємності резервуару при повному заповненні паливом: а) форма деформування; б) переміщення вузлів; в) мембранні зусилля в елементах; г) згинальні моменти в елементах; д) та е) напруження в елементах

Проведені дослідження показали, що для чотирьох видів заповнення резервуара максимальні напруження та деформації спостерігалися в елементах його стінки біля нижньої кромки. В стінці зовнішньої (захисної) ємності мала місце концентрація напружень біля патрубку для зливання пального. Для порівняльного аналізу отримані результати наведено в табл. 2.1 для зовнішньої ємності та в табл. 2.2 – для внутрішньої.

Таблиця 2.1

Результати моделювання напружено-деформованого стану зовнішньої ємності резервуару

Характеристики НДС системи	Навантаження від палива, яке складає частину від об'єму внутрішньої ємності			
	1/4	1/2	3/4	4/4
Напруження, МПа	0,36	0,77	1,27	1,80
Деформація, мм	0,019	0,040	0,091	0,122
Мембранні зусилля, Н/м	1342	2905	4816	6812
Мембранні напруження, МПа	0,28	0,58	0,96	1,36

Таблиця 2.2

Результати моделювання напружено-деформованого стану внутрішньої ємності резервуару

Характеристики НДС системи	Навантаження від палива, яке складає частину від об'єму внутрішньої ємності			
	1/4	1/2	3/4	4/4
Напруження, МПа	12,17	26,59	41,11	55,77
Деформація, мм	0,207	0,476	0,728	0,978
Мембранні зусилля, Н/м	57899	127904	197019	266768
Мембранні напруження, МПа	11,58	25,58	39,40	53,35
Коефіцієнт запасу міцності	13,72	6,28	4,06	2,99

Максимальні напруження змінювались від 12,17 МПа до 55,77 МПа в стінці внутрішньої ємності та від 0,36 МПа до 1,80 МПа в стінці зовнішньої ємності і спостерігались в перших поясах біля патрубку для злива палива. Максимальні деформації набували значення від 0,207 мм до 0,978 мм та від 0,019 до 0,122 мм відповідно стінках внутрішньої та зовнішньої ємностей. Коефіцієнт запасу міцності внутрішньої ємності зменшується зі збільшенням рівня наповнення резервуару, мінімальне значення його близьке до 3, що є прийнятним.

2.2.2. Статичний розрахунок при дії температури

Згідно нормативних документів [12] за характеристичне температурне навантаження приймається середня від'ємна температура середовища з додаванням -5°C , для досліджуваного об'єкта воно становить -25°C . Граничне значення температурного навантаження визначається з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням $\gamma_f = 1,1$ та коефіцієнта надійності за відповідальністю $\gamma_n = 1,2$ (пункт 11.8 в [12]). Воно дорівнює -33°C , але максимальна від'ємна температура середовища на станції складає -38°C . Тому за характеристичне значення температурного навантаження приймаємо -38°C . З урахуванням коефіцієнтів граничне розрахункове температурне навантаження дорівнює $-50,2^{\circ}\text{C}$. Температурне навантаження моделюється у вигляді зосереджених сил, що прикладені до всіх вузлів всієї моделі.

Для дослідження напружено-деформованого стану оболонок застосовується процедура формування граничних температурних умов Steady-State Heat Transfer та розв'язку нелінійної задачі статички Nonlinear Static методом покрокового навантаження Ньютона-Рафсона. В результаті розрахунку отримано ізополя переміщень вузлів конструкції (м), поперечних сил (Н/м), мембранних зусиль розтягу (Н/м), згинальних моментів (Нм) та еквівалентних напружень в елементах конструкції (МПа).

Забезпечення міцності оцінюється за допомогою коефіцієнта запасу міцності, допустиме напруження було визначено вище і складає $R_y = 163(187)$ МПа. Згідно [12], для листових конструкцій зі зварними швами несприятливими умовами є від'ємні температури середовища, які сприяють виникненню крихкості сталі при перевищенні нормативних допустимих значень від'ємних температур. В даному випадку для сталі Ст3пс2 з урахуванням першої групи

конструкції нормативна допустима від’ємна температура не повинна перевищувати -30°C . Тому додатково перевіряються значення мембранних напружень (розтягу) в елементах, що розташовані біля зварних швів, на умову не перевищення напружень у $0,3R_y$, що для першого поясу оболонок складає 48,9 МПа, а для інших поясів – 56,1 МПа.

При дії граничного розрахункового температурного навантаження максимальні напруження та деформації спостерігалися в елементах стінок біля нижніх та верхніх кромek обох оболонок. Також мала місце концентрація напружень біля патрубків для заливання та зливу пального. Отримані результати наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.3

Результати моделювання впливу температурного навантаження

Характеристики НДС системи	Зовнішня ємність	Внутрішня ємність
Напруження, МПа	60,03	60,14
Переміщення, мм	0,46	0,43
Мембранні зусилля, Н/м	623203	654006
Мембранні напруження, МПа	124,64	130,80
Коефіцієнт запасу міцності	2,72	2,71

Як видно, вплив температурного навантаження зменшує значення коефіцієнта запасу міцності порівняно з мінімальним значенням в табл. 2.2, тим не менше його значення залишається прийнятним.

2.2.3. Статичний розрахунок при навантаженні від ваги обладнання та додаткових елементів конструкції

Навантаження від ваги обладнання на покрівлі резервуару та додаткових елементів конструкцій (безпосередньо покрівлі двох ємностей, огорожі та спеціальне обладнання) згідно [12] відноситься до постійних навантажень. Воно моделюється у вигляді зосереджених сил, які прикладаються до вузлів верхніх кромek двох оболонок. Розраховане характеристичне значення навантаження від ваги покрівлі та огорожі на один вузол зовнішньої оболонки дорівнює 680,14 Н, а внутрішньої оболонки – 473,38 Н. Характеристичне значення навантаження від обладнання визначається із врахуванням його маси, яка приймалася рівною 20кг, 50кг та 100 кг, і відповідно приймає значен-

ня 196,64 Н, 491,6 Н та 983,2 Н. Навантаження від обладнання прикладались до відповідних вузлів верхньої кромки обох оболонок. При визначенні граничного розрахункового навантаження від ваги елементів конструкції враховується коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_f = 1,1$ та коефіцієнт відповідальності конструкції $\gamma_n = 1,2$. Тоді граничне розрахункове значення навантаження від ваги покрівлі та огорожі на один вузол зовнішньої оболонки дорівнює 897,78 Н, на один вузол внутрішньої оболонки – 624,86 Н; від ваги обладнання – відповідно 259,56 Н, 648,91 Н та 1297,82 Н для різних значень маси обладнання.

Для дослідження напружено-деформованого стану конструкції застосовується процедура розв'язання нелінійної задачі статки Nonlinear Static програмного комплексу NASTRAN [37] за допомогою модифікованого методу Ньютона-Рафсона. Для ілюстрації результатів дослідження на рис. 2.4 наведено ізополя переміщень вузлів, а на рис. 2.5 – ізополя еквівалентних напружень в зовнішній та внутрішній ємностях резервуару.

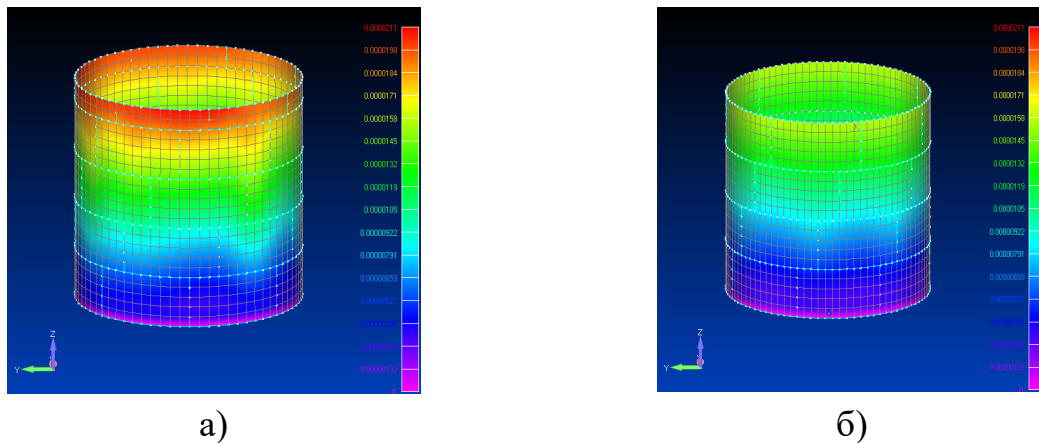


Рис. 2.4. Переміщення вузлів зовнішньої (а) та внутрішньої (б) ємностей

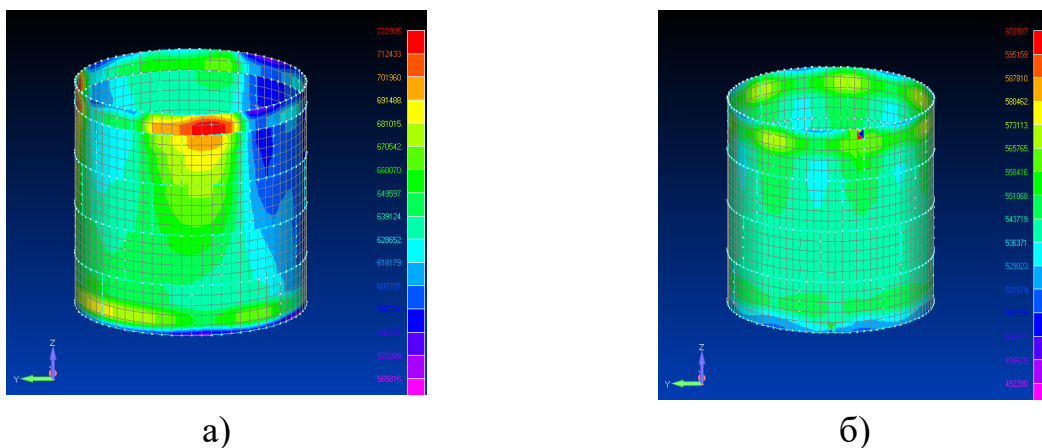


Рис. 2.5. Напруження в елементах зовнішньої (а) та внутрішньої (б) ємностей

Результати дослідження наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Результати моделювання впливу навантаження від обладнання

Характеристики НДС системи	Зовнішня ємність	Внутрішня ємність
Напруження, МПа	0,723	0,603
Переміщення, мм	0,021	0,016
Мембранні зусилля, Н/м	263,8	195,5
Мембранні напруження, МПа	0,0528	0,0391
Коефіцієнт запасу міцності	225	270

Як видно, значення коефіцієнтів запасу міцності набагато перевищують їх значення, отримані для впливу температурного навантаження та навантаження від ваги пального.

2.2.4. Статичний розрахунок при дії снігового навантаження

Навантаження від ваги снігу згідно [12] може відноситися до змінних короткочасних або тривалих навантажень. В даних дослідженнях снігове навантаження будемо вважати змінним тривалим для зазначеного раніше місця розташування резервуару. Навантаження моделюється у вигляді осьового навантаження на верхню кромку зовнішньої оболонки. Характеристичне значення навантаження від ваги снігу визначаємо з наведених даних [9,24]: сніг висотою 2 м в умовах відкритого простору, питома вага снігу – 400 кг/м^3 , що відповідає умовам тундри. При визначенні граничного розрахункового снігового навантаження враховується коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_f = 1,6$ та коефіцієнт відповідальності конструкції $\gamma_n = 1,2$. Граничне розрахункове значення навантаження дорівнює $574551,02 \text{ Н}$, навантаження прикладається до вузлів верхньої кромки зовнішньої оболонки у вигляді сукупності зосереджених сил зі значенням $7979,88 \text{ Н}$ у вузлі.

Для дослідження напружено-деформованого стану конструкції застосовується процедура розв'язання нелінійної задачі статички Nonlinear Static програмного комплексу NASTRAN [37] за допомогою модифікованого методу Ньютона-Рафсона. В результаті розрахунку отримані ізополя переміщень вузлів конструкції, поперечних сил, мембранних розтягу зусиль розтягу та напружень, згинальних моментів та еквівалентних напружень в елементах

конструкції. Визначено коефіцієнти запасу міцності конструкції. Узагальнені результати досліджень наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Результати моделювання впливу снігового навантаження

Характеристики НДС системи	Зовнішня ємність	Внутрішня ємність
Напруження, МПа	5,562	0,776
Переміщення, мм	0,169	0,021
Мембранні зусилля, Н/м	2059	513,5
Мембранні напруження, МПа	0,0068	0,0022
Коефіцієнт запасу міцності	30	210

Так як снігове навантаження в основному впливає на зовнішню захисну ємність, то всі значення характеристик НДС для зовнішньої ємності значно перевищують значення, отримані для конструкції внутрішньої ємності. Відповідно і значення коефіцієнту запасу міцності конструкції зовнішньої ємності в 7 разів менше за його значення для внутрішньої ємності резервуару.

2.2.5. Статичний розрахунок при дії комбінованого навантаження

Комбіноване навантаження згідно [12] моделювалось у вигляді лінійної суми граничних розрахункових значень навантажень від ваги палива при повному заповненні резервуару, ваги снігу, ваги елементів конструкції та від'ємної температури з врахуванням коефіцієнтів сполучення 1,0 для всіх навантажень. В результаті дослідження напружено-деформованого стану конструкції отримано ізополя переміщень вузлів конструкції, поперечних сил, мембранних зусиль розтягу та напружень, згинальних моментів та еквівалентних напружень в елементах конструкції. Визначено коефіцієнти запасу міцності конструкції із порівняння максимальних еквівалентних напружень в елементах конструкції з граничним значенням розрахункового опору сталі, яке є допустимим напруженням $R_y=163$ МПа для першого поясу і $R_y=187$ МПа для інших поясів резервуарів. Перевірено наявність несприятливих умов експлуатації конструкції при низьких температурних режимах: не перевищення розрахункових значень мембранних напружень в місцях зварних швів, яке складає $0,3R_y$: для першого поясу $0,3 \cdot 163 = 48,9$ МПа, для інших поясів $0,3 \cdot 187 = 56,1$ МПа.

На рис. 2.6 наведено форму деформування конструкції резервуару та стінок двох його ємностей в місцях їх з'єднання.

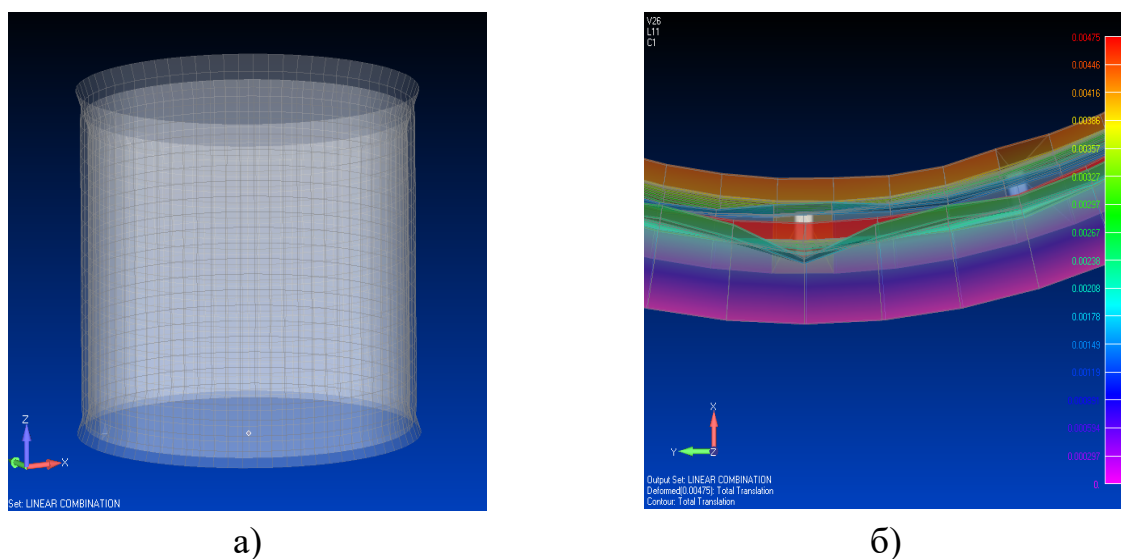


Рис. 2.6. Форма деформування конструкції резервуару (а) та деформування стінок ємностей в місцях з'єднання (б) при дії комбінованого навантаження

Як приклад, на рис. 2.7 наведено ізополя переміщень вузлів конструкції, а на рис. 2.8 – ізополя еквівалентних напружень в елементах конструкції.

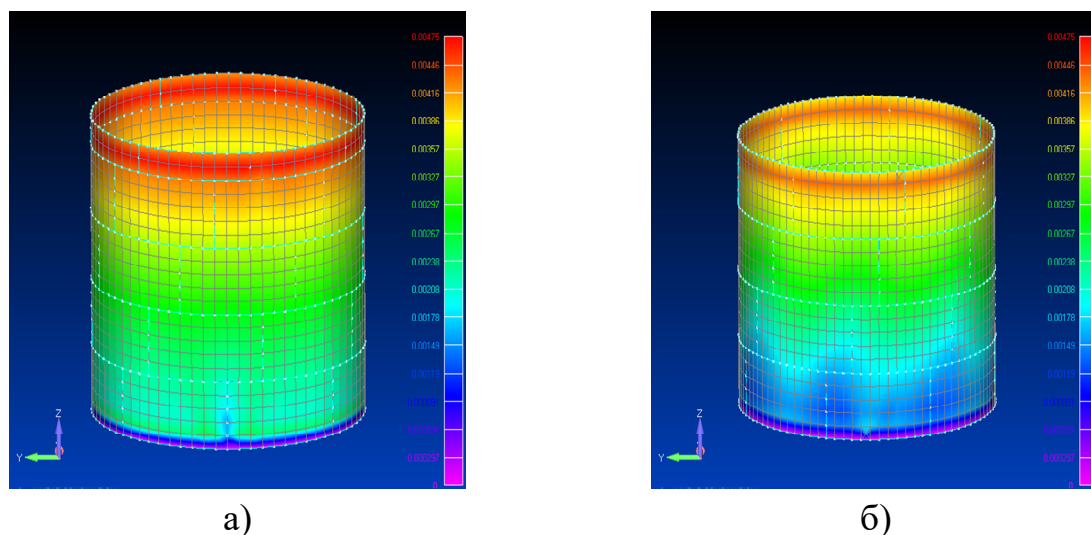


Рис. 2.7. Переміщення вузлів конструкції: а) зовнішньої ємності; б) внутрішньої ємності

При дії граничного розрахункового комбінованого навантаження елементи першого поясу внутрішньої ємності є більш напруженими ніж елементи інших поясів.

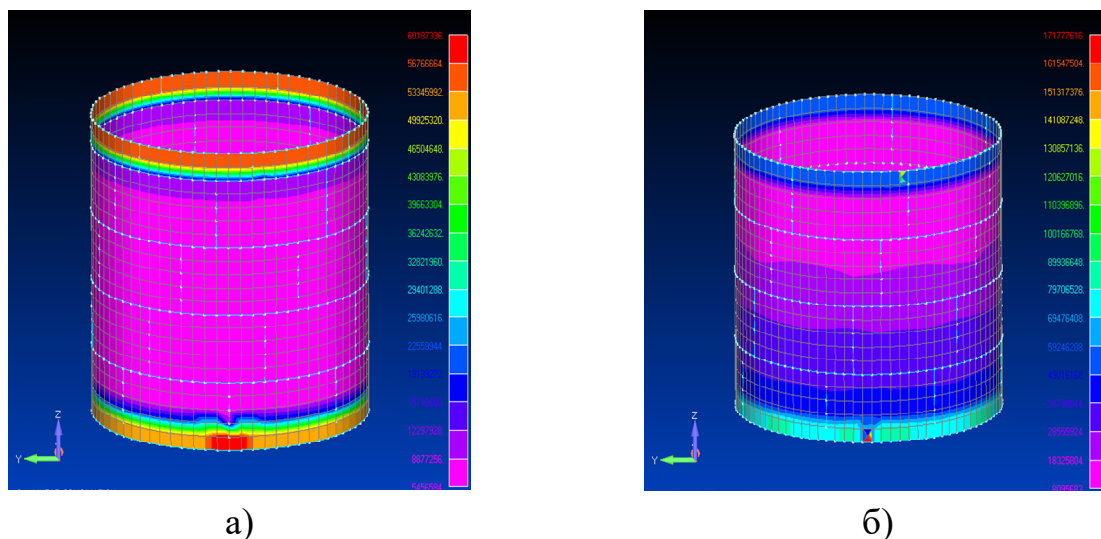


Рис. 2.8. Еквівалентні напруження елементів конструкції: а) зовнішньої ємності; б) внутрішньої ємності

Результати дослідження НДС резервуару при дії комбінованого навантаження наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Результати моделювання впливу комбінованого навантаження

Характеристики НДС системи	Зовнішня ємність	Внутрішня ємність
Напруження, МПа	63,737	171,778
Переміщення, мм	4,75	4,46
Мембранні зусилля, Н/м	614294	662986
Мембранні напруження, МПа	2,027	2,871
Коефіцієнт запасу міцності	2,56	0,95<1

Максимальне напруження 171,778 МПа спостерігається в елементі першого поясу внутрішньої ємності біля патрубку для зливу пального, воно перевищує допустиме напруження 163 МПа. В елементі верхнього четвертого поясу цієї ж оболонки біля патрубку для заливання палива має місце напруження 130,327 МПа. В стінці зовнішньої ємності більш напруженими є елементи першого поясу біля кромки оболонки (60,12 МПа) і біля патрубку для зливу палива (63,737 МПа). Елементи верхнього поясу зовнішньої ємності також є достатньо напруженими (52,561 МПа). Максимальні переміщення вузлів внутрішньої та зовнішньої значно перевищують такі переміщення, розраховані для кожного з навантажень окремо. Коефіцієнт запасу міцності

внутрішньої ємності має значення менше за одиницю, що є не прийнятним значенням і несе загрозу руйнування конструкції при впливі такого найбільш несприятливого комбінованого навантаження.

2.3. Дослідження статичної стійкості конструкції при дії навантаження від ваги пального

Стійкість системи з'єднаних циліндрів (зовнішньої та внутрішньої ємностей) досліджена за допомогою процедури *Bucling* програмного комплексу *NASTRAN* [24,37]. Форми втрати стійкості та критичні значення бокового тиску від дії пального визначено при розв'язанні задачі на власні значення методом Ланцоша, отримано коефіцієнти запасу стійкості, які показують у скільки разів критичне навантаження перевищує значення граничного розрахункового навантаження. Визначено та досліджено десять перших форм втрати стійкості системи двох з'єднаних ємностей при різних рівнях заповнення резервуару паливом. У якості ілюстрації результатів на рис. 2.9 наведено першу форму втрати стійкості для різного рівня заповнення резервуару.

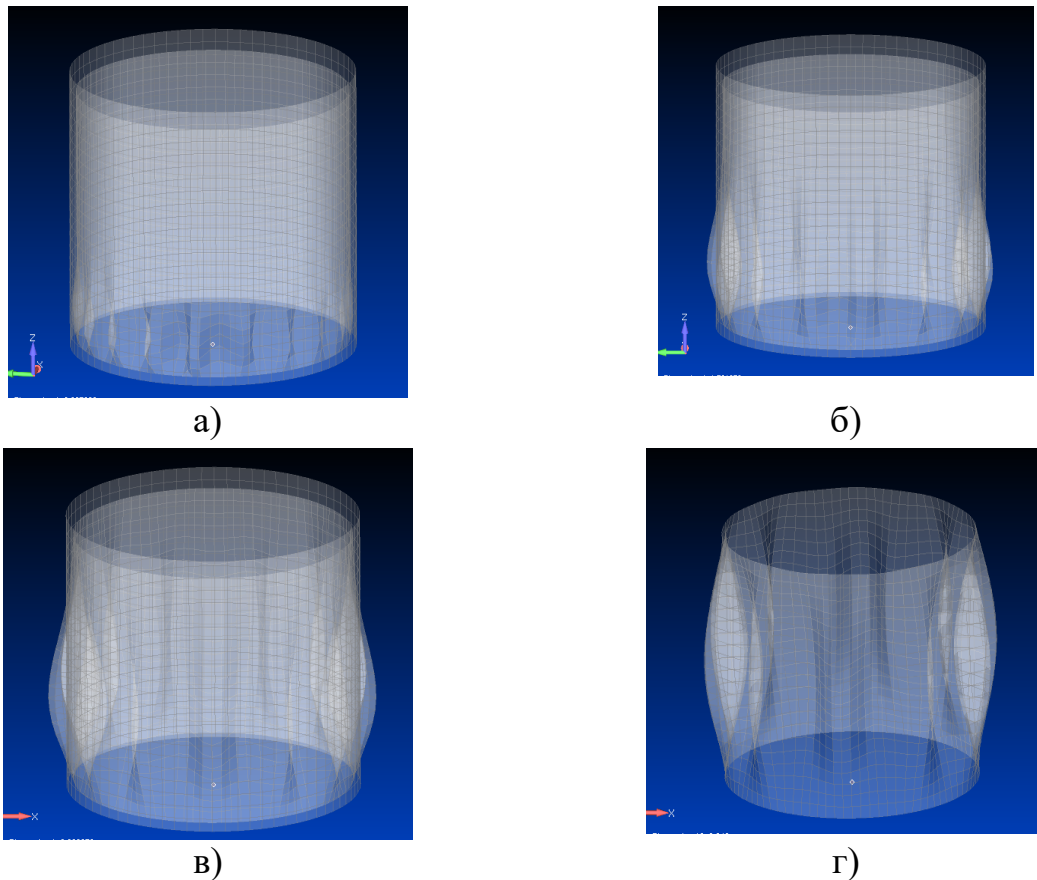


Рис. 2.9. Перша форма втрати стійкості при рівні заповнення резервуару:
а)1/4; б)1/2; в)3/4; г)4/4

Результати дослідження показали, що при заповненні резервуару на рівні $1/4$ по перших десяти формах втрачає стійкість внутрішня ємність, її стінка має як випучини так і вм'ятини [24]. Деформації мають нерегулярний характер вздовж кола, вздовж твірної стінка внутрішньої ємності по десяти формах деформується по-різному, але залишаються випучини і вм'ятини у вигляді півхвилі. В місцях з'єднання трубопроводів з оболонками спостерігаються локальні деформації. При втраті стійкості конструкції від дії ваги палива форми деформування відрізняються від форм втрати стійкості при окремому розрахунку стійкості внутрішньої ємності, які завжди циклічні по колу. Критичні значення навантаження, які отримані в розрахунках, щільні за значеннями. Коефіцієнти запасу стійкості лежать в діапазоні $[6,81 - 7,09]$, вони більші за одиницю, що свідчить про забезпечення стійкості резервуару.

При заповненні резервуару на $1/2$ має місце втрата стійкості внутрішньої ємності за 2, 3, 5, 6, 7 формах [24]. Деформації мають регулярний циклічний характер вздовж кола. Форми втрати стійкості 1, 4, 8, 9, 10 містять нерегулярні деформації внутрішньої оболонки вздовж кола. Вздовж твірної стінка внутрішньої оболонки деформується у вигляді півхвилі. В місцях з'єднання трубопроводів з оболонками спостерігаються локальні деформації. Критичні значення навантаження, які отримані в розрахунках, щільні за значеннями. Коефіцієнти запасу стійкості лежать в діапазоні $[1,59 - 1,69]$. Стійкість резервуару забезпечена, бо коефіцієнти запасу стійкості більше за одиницю.

При заповненні резервуару на $3/4$ по всіх формах втрати стійкості внутрішня ємність має регулярні циклічні деформації вздовж кола [24]. Вздовж твірної спостерігається одна півхвиля. Критичні значення навантаження, які отримані в розрахунках, щільні за значеннями. Коефіцієнти запасу стійкості лежать в діапазоні $[0,69 - 0,73]$, це свідчить про те, що стійкість резервуару не забезпечена.

При повному заповненні паливим резервуару ($4/4$ частини об'єму) спостерігаються циклічні регулярні деформації стінки внутрішньої ємності за всіма формами втрати стійкості зі зміною кількості хвиль по колу. Вздовж твірної за всіма формами має місце одна півхвиля. Критичні значення навантаження від ваги палива, які отримані в розрахунках, щільні за значеннями. Коефіцієнти запасу стійкості лежать в діапазоні $[0,38 - 0,42]$, вони менше за одиницю, тому можна зробити висновок про те, що стійкість резервуару не забезпечена.

Значення коефіцієнтів запасу стійкості за різними формами втрати стійкості для різних рівнів заповнення резервуару наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Форма втрати стійкості	Рівень заповнення паливом частини об'єму резервуара			
	1/4	1/2	3/4	4/4
1	6,81	1,59	0,69	0,38
2	6,88	1,59	0,69	0,38
3	6,89	1,60	0,70	0,38
4	6,91	1,60	0,70	0,38
5	6,93	1,63	0,70	0,40
6	6,95	1,63	0,70	0,40
7	7,02	1,63	0,73	0,42
8	7,05	1,63	0,73	0,42
9	7,07	1,69	0,73	0,42
10	7,09	1,69	0,73	0,42

Результати дослідження стійкості внутрішньої ємності резервуару для зберігання пального в системі із зовнішньою (захисною) ємністю показали, що стійкість системи забезпечена при заповненні паливом на 1/4 та 1/2, а при заповненні на 3/4 та 4/4 резервуару його стійкість не забезпечена. Критичні значення навантажень щільні за значенням, а форми деформування носять як циклічний регулярний так і нерегулярний характер. В місці кріплення патрубку для зливу палива має місце деформація стінки двох оболонок.

Таким чином, на прикладі конструкції та умов експлуатації вертикального сталевого резервуару, який встановлено на українській антарктичній станції Академік Вернадський для зберігання пального, проведено моделювання та статичний розрахунок, в результаті якого досліджено вплив конструктивних та експлуатаційних факторів на несучу здатність та структурну стійкість конструкції бездефектного резервуару. Встановлено, що для бездефектного резервуару є ризики руйнування конструкції при впливі найбільш несприятливого комбінованого навантаження, та ризики втрати структурної стійкості.

2.4. Модальний аналіз бездефектного резервуару

Внаслідок природних збурень при коливанні зовнішньої ємності резервуара створюються передумови для додаткового динамічного навантаження через жорсткі кріплення труб на внутрішню ємність. Наприклад, під час накачки палива в резервуар через верхній патрубок внаслідок падіння палива під тиском і за рахунок жорстких з'єднань внутрішньої і зовнішньої ємностей резервуару у безвітряну погоду відчуються коливання зовнішньої оболонки [34]. Наведені факти свідчать про необхідність дослідження несучої спроможності та динаміки не тільки внутрішньої ємності, а й з урахуванням його технологічних елементів з'єднання з зовнішньою ємністю резервуару, що можна виконати на основі модального аналізу [40].

Модальний аналіз внутрішньої ємності резервуара виконано за допомогою методу Ланцоша, що реалізований в програмному комплексі NASTRAN. У результаті аналізу отримано частоти власних коливань оболонки для перших двадцяти форм коливань. Як ілюстрація аналізу на рис.2.10 наведено першу форму власних коливань по колу та вздовж твірної. У таблиці 2.8 наведено частоти власних коливань, максимальні узагальнені координати та кількість хвиль, які спостерігаються вздовж кола внутрішньої ємності без урахування її взаємодії із зовнішньою ємністю резервуару [40].

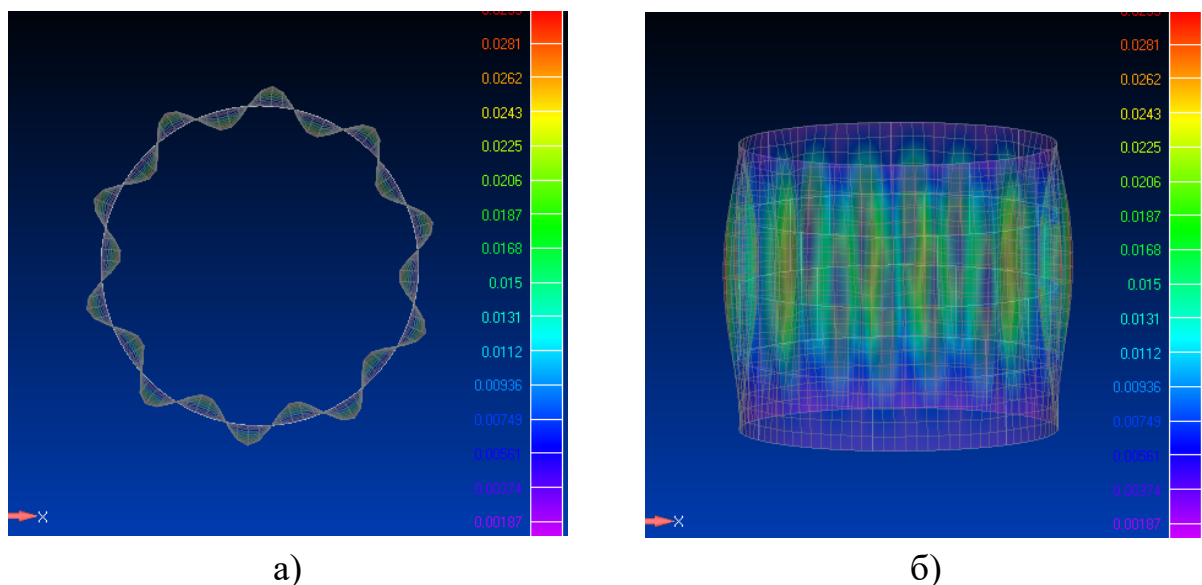


Рис. 2.10. Перша форма власних коливань внутрішньої ємності резервуару:
а) по колу; б) вздовж твірної

Таблиця 2.8.

Результати модального аналізу внутрішньої ємності

Номер форми	Частота, Гц	Кількість хвиль уздовж кола	Максимальне узгальнене переміщення, мм
1	2	3	4
1	15,65	10	0,0299
2	15,65	10	0,0296
3	15,93	9	0,0297
4	15,93	9	0,0294
5	16,44	11	0,0300
6	16,44	11	0,0300
7	17,52	8	0,0297
8	17,52	8	0,0297
9	18,04	12	0,0301
10	18,04	12	0,0301
11	20,23	13	0,0301
12	20,24	13	0,0301
13	20,68	7	0,0295
14	20,68	7	0,0294
15	22,88	14	0,0302
16	22,88	14	0,0302
17	25,75	6	0,0292
18	25,75	6	0,0291
19	25,89	15	0,0303
20	25,89	15	0,0277

Дослідження показали, що регулярні деформації внутрішньої ємності резервуару спостерігаються у вигляді різної кількості півхвиль вздовж кола, уздовж твірної має місце одна півхвиля для всіх форм власних коливань.

Динаміка оболонкових тонкостінних конструкції, які є системами з нескінченим числом ступенів вільності, складна, кількість частот власних коливань є нескінченною. Якщо відомий характер власних коливань конструкції, то можна говорити про її внутрішні властивості, які мають місце при зовнішніх динамічних впливах. Небезпечним для тонкостінних оболонкових конструкцій є поєднання статичних навантажень з різними типами динамічних

навантажень, тому необхідно врахувати вплив статичного навантаження на частоти власних коливань конструкції, для чого було виконано модальний аналіз складної оболонкової конструкції із врахуванням її напружено-деформованого стану, який отримано за допомогою нелінійного статичного розрахунку при дії навантаження, яке моделювалося нерівномірно розподіленим тиском від ваги пального. В результаті оцінено вплив навантаження на власні частоти коливань конструкції.

У зв'язку зі щільним розташуванням частот власних коливань оболонкових конструкцій досліджено сорок перших форм та відповідних частот коливань при дії ваги пального, що займає $1/4$, $1/2$, $3/4$ та $4/4$ частину об'єму внутрішньої оболонки.

Результати модального аналізу показали, що при дії ваги пального, яке займає $1/4$ частину внутрішньої ємності резервуара, частоти навантаженої конструкції мають щільно розташовані значення і лежать в діапазоні від 15,19Гц до 29,16Гц. На цих частотах спостерігаються коливання як з регулярними так і нерегулярними деформаціями внутрішньої і зовнішньої оболонок одночасно, або коливання з деформаціями лише однієї з оболонок. Мають місце локальні деформації в місцях з'єднання оболонок. На власній частоті 18,44Гц вперше відбуваються коливання з регулярними деформаціями внутрішньої оболонки резервуара, зовнішня оболонка залишається незмінною. Власна частота резервуару збільшується за рахунок навантаження. Деформований стан при коливанні навантаженої внутрішньої оболонки відрізняється тим, що вздовж кола кількість півхвиль складає 11, а це на 1 півхвилю більше порівняно з деформацією оболонки без врахування навантаження. Уздовж твірної має місце одна півхвиля як для не навантаженого так і навантаженого внутрішнього резервуара. На більш високих частотах 29,08Гц та 29,16Гц уздовж твірної зовнішньої оболонки спостерігаються дві півхвилі.

Власні частоти навантаженої конструкції при дії ваги пального, що складає $1/2$ частину внутрішньої ємності, також мають щільно розташовані значення і лежать в діапазоні від 15,19Гц до 29,16Гц. Коливання спостерігаються одночасно як з регулярними так і з нерегулярними деформаціями внутрішньої і зовнішньої оболонок, або з деформаціями лише однієї з оболонок. Локальні деформації стінок оболонок спостерігаються в місцях їх з'єднання. На власній частоті 19,22Гц уперше деформується лише внутрішня оболонка, а зовнішня залишається незмінною. Уздовж кола спостерігаються 9 півхвиль, уздовж твірної – одна півхвиля.

При дії ваги пального, що складає $3/4$ частини внутрішньої ємності резервуара, частоти навантаженої конструкції щільно розташовані в діапазоні від 15,19Гц до 30,27Гц. Власні коливання відбуваються з регулярними і нерегулярними деформаціями окремо внутрішньої і зовнішньої оболонок. У місцях кріплення патрубків спостерігаються локальні деформації стінок оболонок. Внутрішня оболонка уперше деформується на частоті 25,05Гц. Уздовж кола мають місце 8 півхвиль, уздовж твірної – 1 півхвиля.

При повному заповненні паливом (4/4) частоти навантаженої конструкції щільно розташовані в діапазоні від 15,19Гц до 32,79Гц. Мають місце коливання з регулярними і нерегулярними деформаціями внутрішньої і зовнішньої оболонок одночасно. Також спостерігаються деформації лише однієї з оболонок, є локальні деформації в місцях з'єднання оболонок. Внутрішня оболонка уперше деформується на частоті 30,84Гц. Власна частота резервуару збільшується за рахунок збільшення ваги рідини, на цій частоті вздовж кола мають місце 7 півхвиль, вздовж твірної – 1 півхвиля.

Модальний аналіз резервуару, як складної оболонкової конструкції показав, що при дії розподіленого навантаження на внутрішню ємність резервуару, власна частота збільшується у 1,17-1,95 разів відповідно зі збільшенням ваги пального. Це свідчить про те, що навантаження збільшує жорсткість системи, а при параметричних коливаннях може їх стабілізувати. Коливання конструкції, при яких вперше спостерігається деформація лише зовнішньої ємності резервуару, відбуваються при дії різних об'ємів пального на однаковій частоті 15,19Гц, яка у 1,08 разів більше за частоту не навантаженої конструкції.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НА ПАРАМЕТРИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РЕЗЕРВУАРУ

3.1. Аналіз впливу корозії металу на несучу здатність резервуару

3.1.1. Побудова моделі внутрішньої ємності резервуару

Внутрішня ємність резервуару є просторовою тонкостінною циліндричною оболонкою. Для моделювання та дослідження її будемо використовувати програмний комплекс скінчено-елементного аналізу MSC.NASTRAN [37]. Модель конструкції складається з дискретних скінченних елементів, що утворюють сітку. Вибір типу елемента залежить від факторів, таких, як геометрична форма, очікувана поведінка конструкції й інших. Властивості кожного елемента обчислюються за стандартними формулами опору матеріалів. Елементи об'єднуються в модель в певних точках простору, які називаються вузлами, і працюють спільно. Вузол моделі залежно від типу, орієнтації і числа елементів може протидіяти поступальним і обертальним переміщенням щодо певних напрямків. Створена в такий спосіб модель дозволяє дослідити поведінку реальної конструкції, визначити реакцію на зовнішні впливи. Деформація тіла визначається за допомогою відповідних переміщень його вузлів, а напружений стан – за еквівалентними напруженнями.

Як зазначено раніше, внутрішній резервуар являє собою металевий циліндр висотою 5,96м і діаметром 6,63м. Стінка резервуара зварена з листів прокату товщиною 5мм, стінка моделюється у вигляді поясів, що складаються з поверхонь (тіл), розміри яких відповідають листам прокату (рис. 2.1,б). Розрахункова модель резервуара формувалася з урахуванням припущення про зварні шви. Кожну поверхню резервуара представлено сукупністю чотирьохкутних плоских скінченних елементів зі шістьма степенями вільності у вузлі типу «Plate». По колу оболонка розбита на 90 частин, по висоті – на 20. Кількість двовірних плоских скінченних елементів всієї моделі складає 1800, кількість вузлів – 1523. Скінченно-елементну модель внутрішньої ємності резервуару наведено на рис. 3.1.

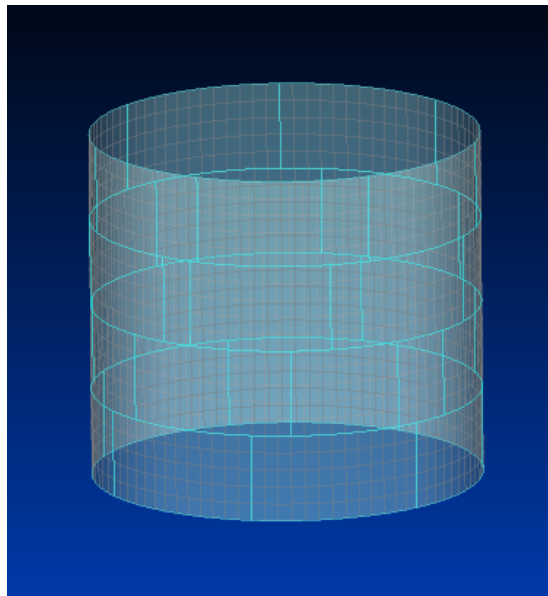


Рис. 3.1. Скінчено-елементна модель внутрішньої ємності резервуару

Граничні умови прийнято відповідно до [12]: у вузлах нижньої кромки резервуара обмежені поступальні переміщення по радіусу, обертальні переміщення – навколо радіуса і дотичної (моделювання розміщення резервуара на дубових брусах). На вузли верхньої кромки резервуара введені обмеження по радіусу та твірній (моделювання обмеження руху покрівлі резервуара).

3.1.2. Вплив корозії металу на несучу здатність внутрішньої ємності резервуару

У багатьох випадках втрата стійкості оболонкових конструкцій відбувається внаслідок геометричних недосконалостей їх стінок. Розглянемо корозію металу стінки внутрішнього резервуару, яка моделюється у вигляді зменшення її товщини на $\Delta=(0,25 - 1,5)$ мм з кроком 0,25 мм. Розглянуто шість варіантів (схем) суцільного потоншення прокатних листів поясів стінки внутрішнього резервуару, як показано на рис. 3.2 [34]. Дослідження нелінійної поведінки внутрішнього резервуару, його напружено-деформованого стану і стійкості при дії статичних навантажень виконується на основі скінченно-елементної моделі конструкції (рис. 3.1) з урахуванням різних схем потоншення (рис. 3.2, червоним кольором зображено пояси з потоншенням) і різної товщини стінки внутрішнього резервуару в результаті потоншення на величину із зазначеного вище інтервалу значень.

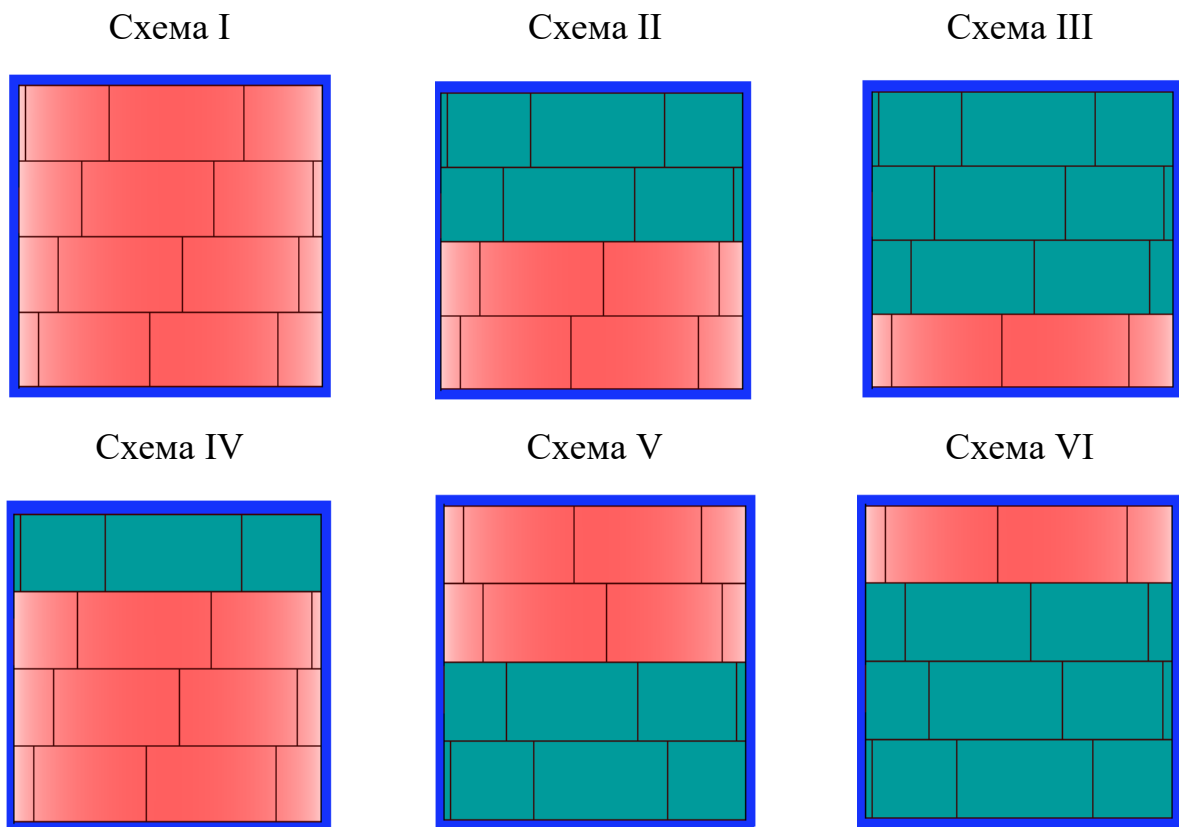


Рис. 3.2. Схеми потоншення стінки внутрішньої ємності резервуару

Аналіз результатів показав, що максимальні напруження та деформації при втраті стійкості спостерігаються в нижньому поясі внутрішнього резервуара при всіх розглянутих варіантах потоншення стінки. Рис. 3.3 та рис. 3.4 ілюструють напружено-деформований стан внутрішньої ємності резервуару при потоншенні стінки на 1,5мм відповідно за схемою I та схемою IV при втраті стійкості.

Під час моделювання при визначенні критичного значення навантаження ($q_{кр}$) перевірено виконання умови міцності стінки, яка полягає у тому, що максимальні напруження не повинні перевищувати допустимого напруження 163МПа в першому і 187МПа в інших поясах стінки резервуара. Також перевірено умову жорсткості стінки резервуара, за якої максимальні деформації не повинні перевищувати допустимих значень. Для цього використано покрокове прикладання навантаження (q), яке поступово збільшувалося до значення чотирьох граничних експлуатаційних навантажень ($q=4q_p$), оцінювалось переміщення вузла нижнього поясу резервуару з потоншенням стінки на 1,5мм за схемою IV.

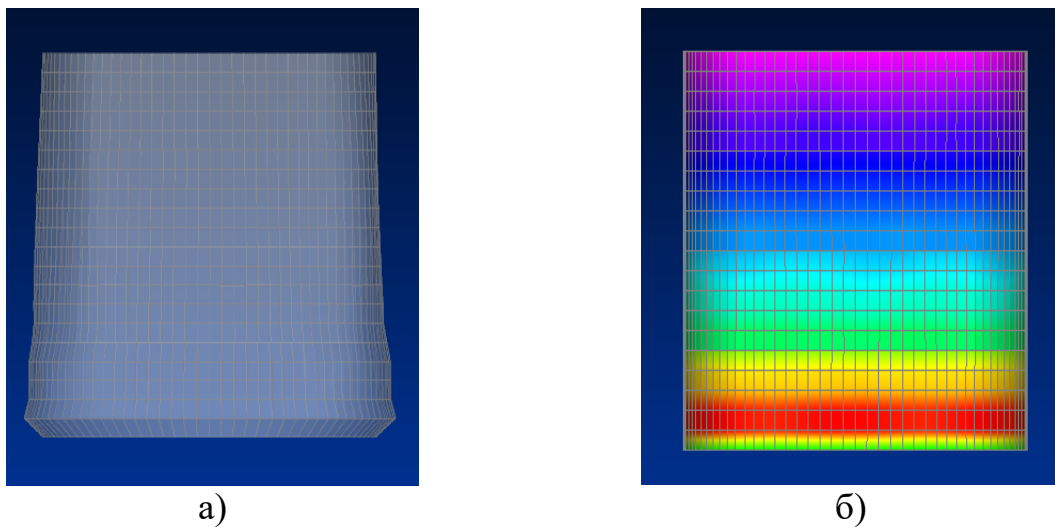


Рис. 3.3. Деформації (а) та напруження (б) при потоншенні стінки на $\Delta=1,5\text{мм}$ за схемою I

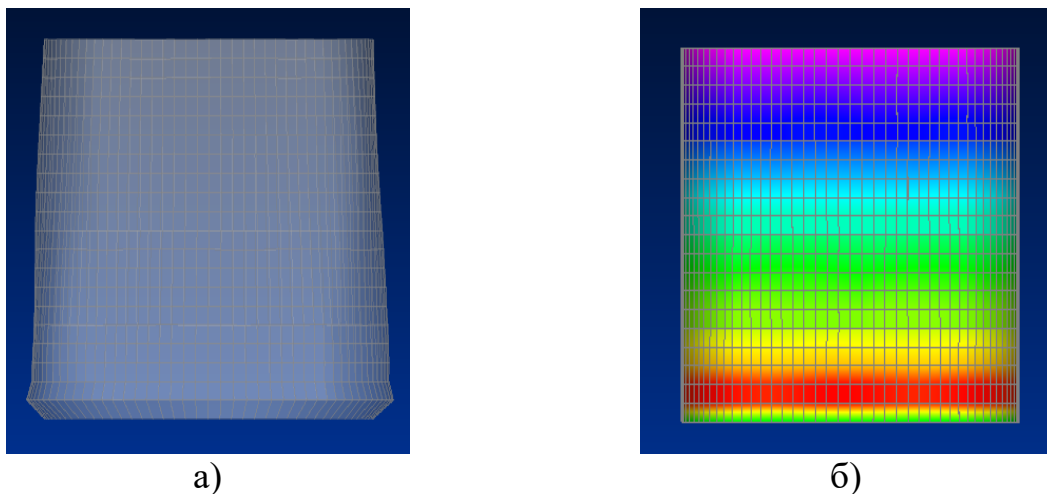


Рис. 3.3. Деформації (а) та напруження (б) при потоншенні стінки на $\Delta=1,5\text{мм}$ за схемою IV

Для дослідження застосовано модифікований метод Ньютона-Рафсона, в результаті дослідження встановлено, що втрата стійкості відбулась при навантаженні, яке є критичним і у 2,5 рази більше за граничне розрахункове значення ($q=q_{кр}=2,5q_p$), при цьому максимальні переміщення досягають значень 3,4 мм і спостерігаються в нижньому поясі стінки внутрішньої ємності резервуару.

У табл. 3.1 наведено значення коефіцієнтів запасу стійкості внутрішньої ємності резервуару для різних схем та різної величини потоншення стінки.

Таблиця 3.1

Коефіцієнти запасу стійкості внутрішньої ємності резервуару

Номер схеми	Величина потоншення стінки Δ , мм					
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
I	3,359	3,178	2,997	2,817	2,637	2,456
II	3,359	3,177	2,996	2,815	2,635	2,455
III	3,359	3,177	2,996	2,815	2,635	2,455
IV	3,359	3,177	2,996	2,815	2,635	2,455
V	3,387	3,387	3,387	3,387	3,387	3,387
VI	3,387	3,386	3,386	3,386	3,386	3,386

З наведених в табл. 3.1 результатів видно, що для перших чотирьох схем, в яких має місце потоншення стінок першого (нижнього) поясу, зі збільшенням параметра Δ коефіцієнт запасу стійкості зменшується. Так, при зменшенні товщини стінки на 1,5мм коефіцієнт запасу стійкості зменшився приблизно на 30%. При потоншенні стінок верхнього поясу (схема V) та верхніх двох поясів (схема VI) вплив корозії на стійкість резервуару не спостерігається.

3.1.3. Вплив корозії металу на несучу здатність резервуару

Для дослідження використаємо розроблену скінчено-елементну модель резервуару, як системи двох з'єднаних циліндричних оболонок (рис. 2.1,в). Внутрішня оболонка розбита по колу на 90 частин, по висоті – на 20; зовнішня по колу – на 72 частини, по висоті – на 22. Патрубки для закачування та зливу пального моделюються двома стрижневими елементами типу «Tube», у місцях закріплення патрубків чотирьохкутні плоскі скінченні елементи внутрішньої оболонки замінені на трикутні. Кількість двомірних плоских скінченних елементів всієї моделі складає 3548, кількість вузлів – 3392.

Граничні умови прийнято відповідно до [12]: у вузлах нижньої кромки внутрішнього резервуару обмежені поступальні переміщення по радіусу, обертальні переміщення – навколо радіуса і дотичної (моделювання розміщення резервуара на дубових брусах). Вузли нижньої кромки зовнішнього резервуару жорстко закріплені. На вузли верхніх кромек двох оболонок введені обмеження по радіусу та твірній (моделювання обмеження руху покрів-

лями ємностей резервуару). Основними навантаженнями на резервуар є вага пального, покрівлі та обладнання.

Моделювання впливу корозії металу на резервуар проходило за тими ж методиками, що й для внутрішньої ємності, зокрема моделювалось потоншення стінок тільки внутрішньої ємності за наведеними на рис. 3.2 схемами для тих самих значень параметру потоншення Δ .

У табл. 3.2 наведено значення коефіцієнтів запасу стійкості резервуару, як системи двох з'єднаних оболонок.

Таблиця 3.2

Коефіцієнти запасу стійкості резервуару

Номер схеми	Величина потоншення стінки внутрішньої ємності Δ , мм					
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
I	2,801	2,655	2,494	2,339	2,186	2,036
II	2,801	2,655	2,494	2,338	2,185	2,035
III	2,801	2,655	2,493	2,337	2,185	2,035
IV	2,801	2,655	2,493	2,337	2,185	2,034
V	2,893	2,893	2,893	2,893	2,893	2,893
VI	2,893	2,892	2,893	2,893	2,893	2,893

Отримані результати показали, що за рахунок наявності елементів з'єднання двох оболонок у більш небезпечному стані буде знаходитися резервуар, як об'єкт дослідження, порівняно з окремо взятою внутрішньою ємністю. Необхідний запас стійкості внутрішньої ємності резервуара з урахуванням потоншення стінки не забезпечено, як показано в [41].

3.2. Аналіз впливу тріщини в зварних швах ємностей резервуару на параметри напружено-деформованого стану та стійкість

3.2.1. Моделювання тріщин

Одними з найпоширеніших дефектів зварних конструкцій є тріщини зварних швів. Це обумовлює необхідність моделювання наявності тріщин у зварних швах стінок внутрішньої та зовнішньої ємностей резервуару. Вертикальну тріщину розміщено в другому поясі кожної з оболонок, горизонтальну – між першим та другим поясами кожної з оболонок. Тріщини в зварних

швах моделювались за допомогою сукупності трикутних та чотирикутних плоских скінченних елементів (рис. 3.4). Ширина розкриття тріщини дорівнює діаметру зварного шва 5мм. Довжина тріщини приймалася такою, що відповідає відносному розміру тріщини $\Delta l/l$ від 0,02 до 0,2, де Δl – довжина тріщини, l – довжина зварного шва в напрямку поширення тріщини [34].

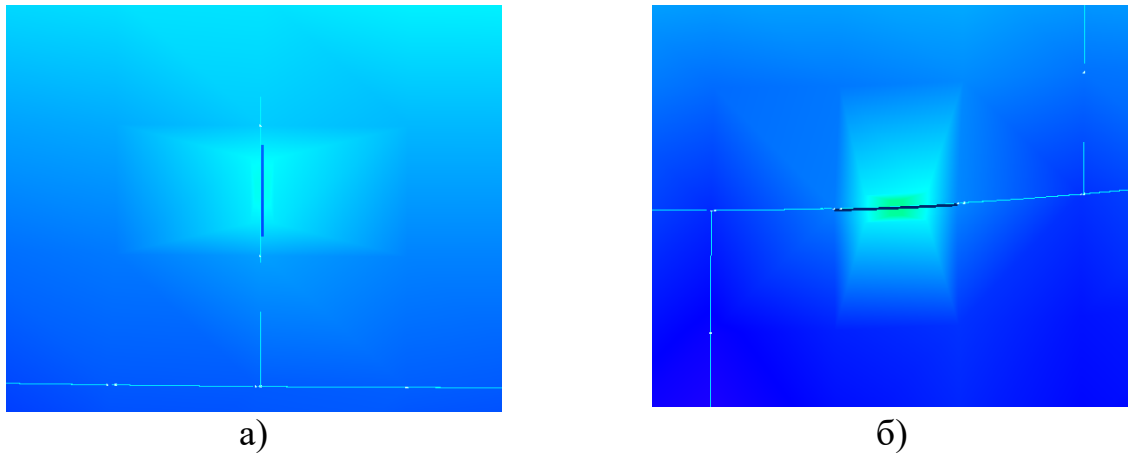


Рис. 3.4. Модель вертикальної (а) та горизонтальної (б) тріщин в зварних швах

Напружено-деформований стан резервуару досліджувався при дії статичних вертикальних розрахункових навантажень відповідно до викладеного в п. 2.2.

3.2.2. Вплив тріщин у зварних швах внутрішньої ємності

Вплив вертикальної тріщини на напружено-деформований стан внутрішньої ємності резервуару при дії вертикального навантаження наведено на рис. 3.5, а вплив горизонтальної тріщини – на рис. 3.6 [34].

Максимальні напруження та переміщення в стінці внутрішньої ємності резервуару, отримані під час моделювання при появі та збільшенні відносного розміру тріщин, наведено в табл. 3.3 для вертикальної тріщини та в табл. 3.4 – для горизонтальної тріщини.

Отримані результати свідчать про те, що при дії вертикального навантаження на внутрішню ємність з тріщиною спостерігається збільшення максимальних напружень в її стінці: з вертикальною тріщиною – на 11% - 31%, горизонтальною – на 28% - 236%. Максимальні переміщення майже не змінюються. Максимальні напруження і переміщення в елементах внутрішньої

ємності без тріщин спостерігались в місці її з'єднання із зовнішньою ємністю, а з тріщинами – в елементах, що моделюють тріщину.

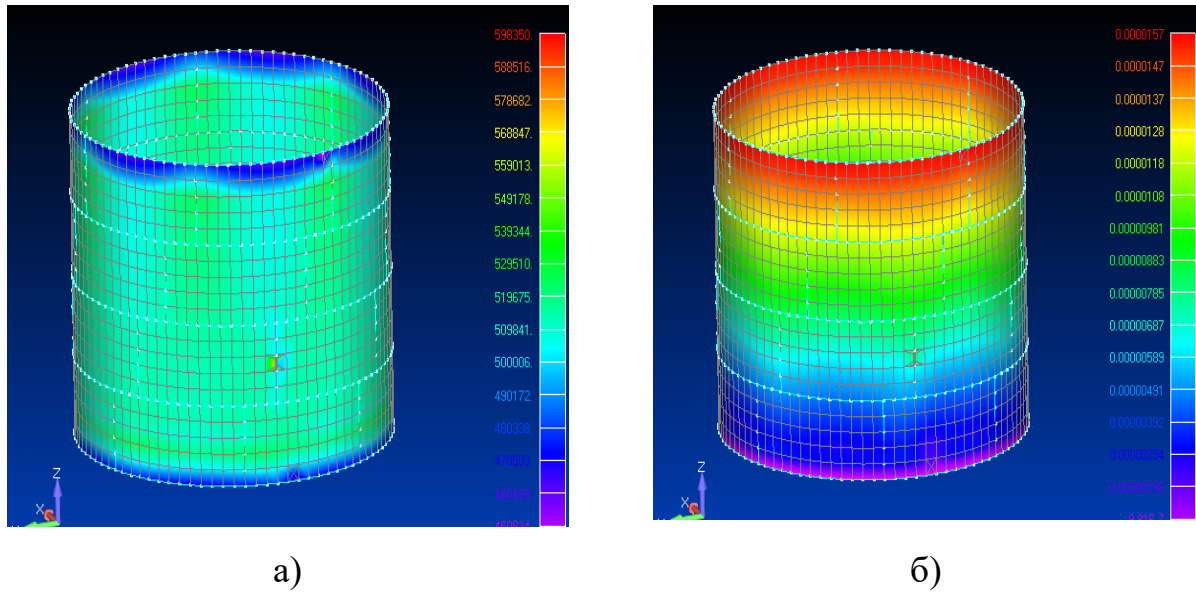


Рис. 3.5. Напружено-деформований стан внутрішньої ємності з вертикальною тріщиною: а) напруження; б) деформації

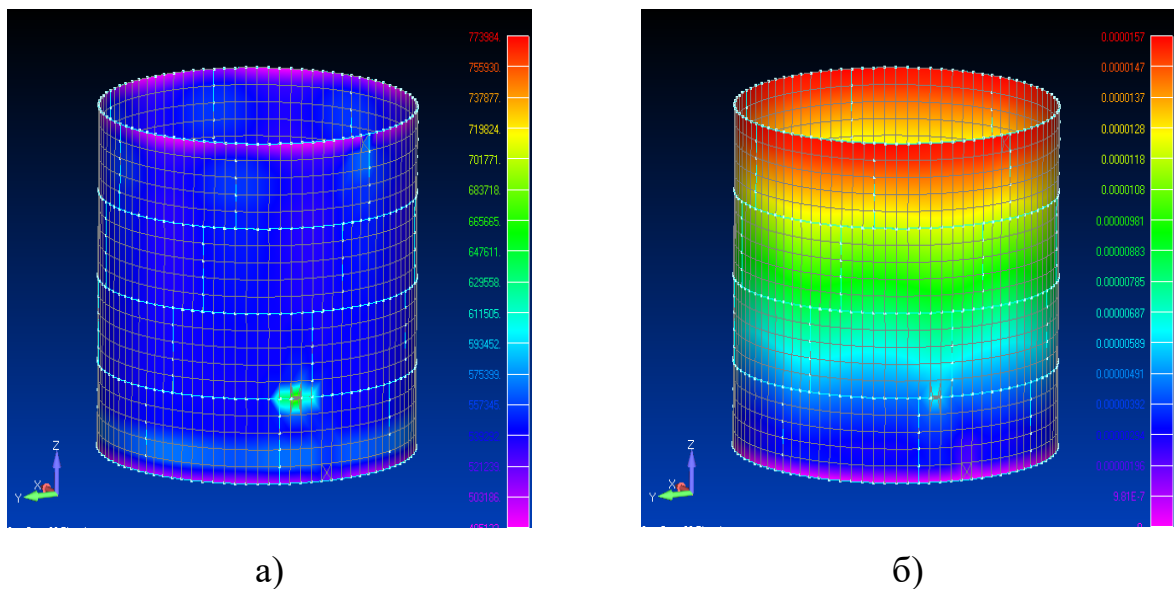


Рис. 3.6. Напружено-деформований стан внутрішньої ємності з горизонтальною тріщиною: а) напруження; б) деформації

Таблиця 3.3

Вплив вертикальної тріщини у шві внутрішньої ємності на напружено-деформований стан

Характеристики НДС	Відносний розмір тріщини Δ/l					
	0,02	0,06	0,1	0,14	0,18	0,2
Напруження, кПа	670	689	698	716	781	791
Деформації, мм	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016

Таблиця 3.4

Вплив горизонтальної тріщини у шві внутрішньої ємності на напружено-деформований стан

Характеристики НДС	Відносний розмір тріщини Δ/l					
	0,02	0,06	0,1	0,14	0,18	0,2
Напруження, кПа	774	1114	1496	1816	1960	2023
Деформації, мм	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016

Як вже згадувалося раніше, однією з причин втрати несучої здатності резервуарами є втрата ними стійкості. Лінійну статичну стійкість резервуару досліджено за допомогою процедури *Buckling* програмного комплексу *NASTRAN*. Приклад результатів моделювання внутрішньої ємності з вертикальною тріщиною при дії вертикального навантаження наведено на рис. 3.7.

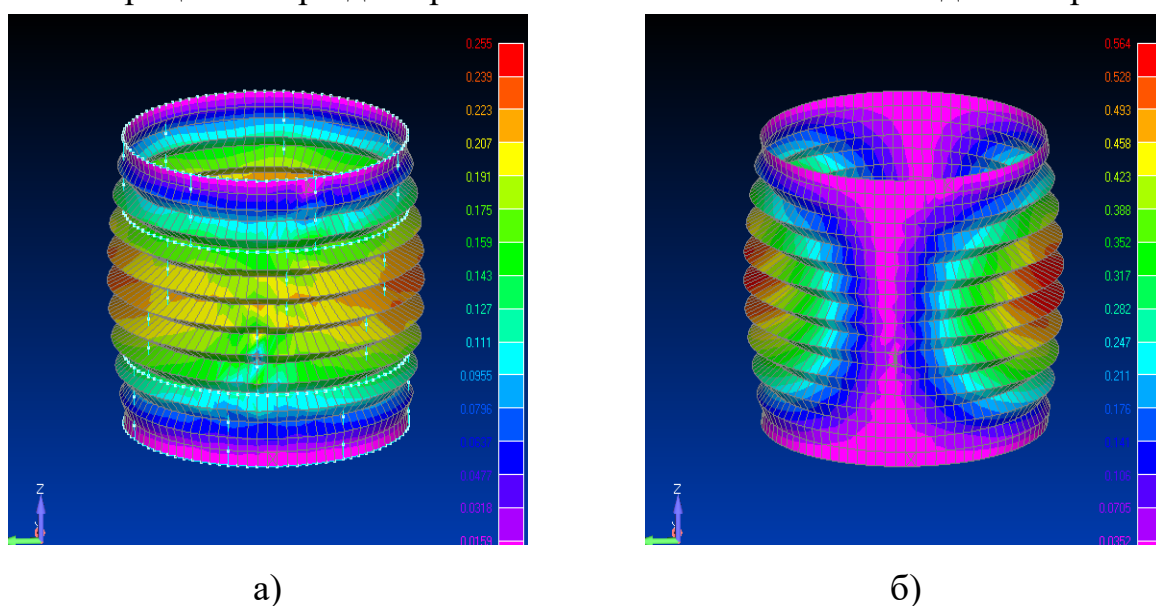


Рис. 3.7. Форми втрати стійкості при $\Delta/l = 0,02, \dots, 0,1$: а) перша; б) друга

Розрахунок показав, що форма втрати стійкості внутрішньої ємності з вертикальною тріщиною залежить від довжини тріщини. При $\Delta l/l = 0,12, \dots, 0,2$ перша форма є локальною формою втрати стійкості в місці розташування тріщини. Загальною формою втрати стійкості є друга форма, яка співпадає з першою формою при $\Delta l/l = 0,02, \dots, 0,1$ і має 9 півхвиль уздовж твірної резервуара. При нелінійному розрахунку (Nonlinear static) максимальні напруження спостерігаються в місці тріщини, максимальні переміщення – у верхньому поясі і в місці тріщини.

У результаті дослідження впливу горизонтальної тріщини встановлено, що форми втрати стійкості внутрішньої ємності з горизонтальною тріщиною однакові для всіх розглянутих довжин тріщини. При першій формі втрати стійкості вздовж кола спостерігається послідовне збільшення його діаметру до середини резервуара, вздовж твірної резервуара – 9 півхвиль. При нелінійному розрахунку максимальні напруження спостерігаються в місці тріщини, максимальні переміщення в верхньому поясі і в місці тріщини.

Наявність тріщин в зварних швах внутрішньої ємності зменшує коефіцієнт запасу стійкості при дії граничного розрахункового вертикального навантаження з 250 до 98 для вертикальної та з 220 до 93 для горизонтальної.

3.2.3. Вплив тріщин у зварних швах зовнішньої ємності

Так само, як і для внутрішньої ємності, проведено аналіз впливу вертикальної та горизонтальної тріщин у зварних швах зовнішньої ємності резервуару на характеристики НДС. Результати дослідження (максимальні значення напруження та переміщення в стінці зовнішньої ємності наведено в табл. 3.5 для вертикальної тріщини і в табл. 3.6 – для горизонтальної.

Таблиця 3.5

Вплив вертикальної тріщини у шві зовнішньої ємності на напружено-деформований стан

Характеристики НДС	Відносний розмір тріщини $\Delta l/l$					
	0,02	0,06	0,1	0,14	0,18	0,2
Напруження, кПа	729	748	800	818	941	963
Деформації, мм	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9

Таблиця 3.6

Вплив горизонтальної тріщини у шві зовнішньої ємності на напружено-деформований стан

Характеристики НДС	Відносний розмір тріщини $\Delta l/l$					
	0,02	0,06	0,1	0,14	0,18	0,2
Напруження, кПа	940	1155	1685	2056	2331	2461
Деформації, мм	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9

При дії вертикального навантаження на зовнішню ємність резервуару з тріщиною спостерігається збільшення максимальних напружень у стінці: з вертикальною тріщиною – на 9% - 33%, горизонтальною – на 12% - 240%.

Максимальні переміщення майже не змінюються. а максимальні напруження в зовнішній ємності з тріщинами спостерігаються в елементах, що моделюють тріщину. Вплив горизонтальної тріщини на максимальні напруження в елементах конструкції значно більший ніж вплив вертикальної тріщини.

Проведений аналіз вплив тріщин у зовнішній ємності резервуару на лінійну статичну стійкість показав, що форма втрати стійкості ємності з вертикальною тріщиною залежить від довжини тріщини. При $\Delta l/l = 0,14, \dots, 0,2$ перша форма є локальною формою втрати стійкості в місці розташування тріщини. Загальною формою втрати стійкості зовнішньої ємності є друга форма, яка співпадає з першою формою при $\Delta l/l = 0,02, \dots, 0,12$ і має 9 півхвиль вздовж твірної зовнішньої ємності. Горизонтальна тріщина в зварному шві зовнішньої ємності має вплив на форми втрати стійкості, подібний до впливу горизонтальної тріщини у внутрішній ємності резервуару.

Наявність тріщин в зварних швах зовнішньої ємності зменшує коефіцієнт запасу стійкості при дії граничного розрахункового вертикального навантаження: вертикальна тріщина – з 223 до 120, горизонтальна – з 187 до 73. Вертикальна тріщина з максимально прийнятим відносним розміром $\Delta l/l = 0,2$ зменшила коефіцієнт запасу стійкості в 2,7 рази, горизонтальна тріщина – в 4,4 рази. Таким чином, стійкість конструкції при дії статичних навантажень та при наявності тріщин в зварних швах зменшується, але знаходиться в допустимих межах.

3.3. Аналіз впливу пошкоджень на динамічні характеристики резервуару

Проведено дослідження впливу потоншення стінок внутрішньої ємності резервуару внаслідок корозії та наявності вертикальної або горизонтальної тріщини різного відносного розміру у зварних швах ємностей на форми та частоти коливань резервуару.

Модальний аналіз внутрішньої ємності резервуару з урахуванням корозії металу для різних схем потоншення стінки виконано за допомогою методу Ланцоша, що реалізований в програмному комплексі NASTRAN. У таблиці 3.7 наведено перші частоти власних коливань внутрішнього резервуару з потоншенням стінки на $\Delta=[0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5]$ мм.

На рис. 3.8 наведено приклади першої форми коливань при потоншенні стінки на $\Delta=0,25$ мм за схемою I, схемою II та схемою IV.

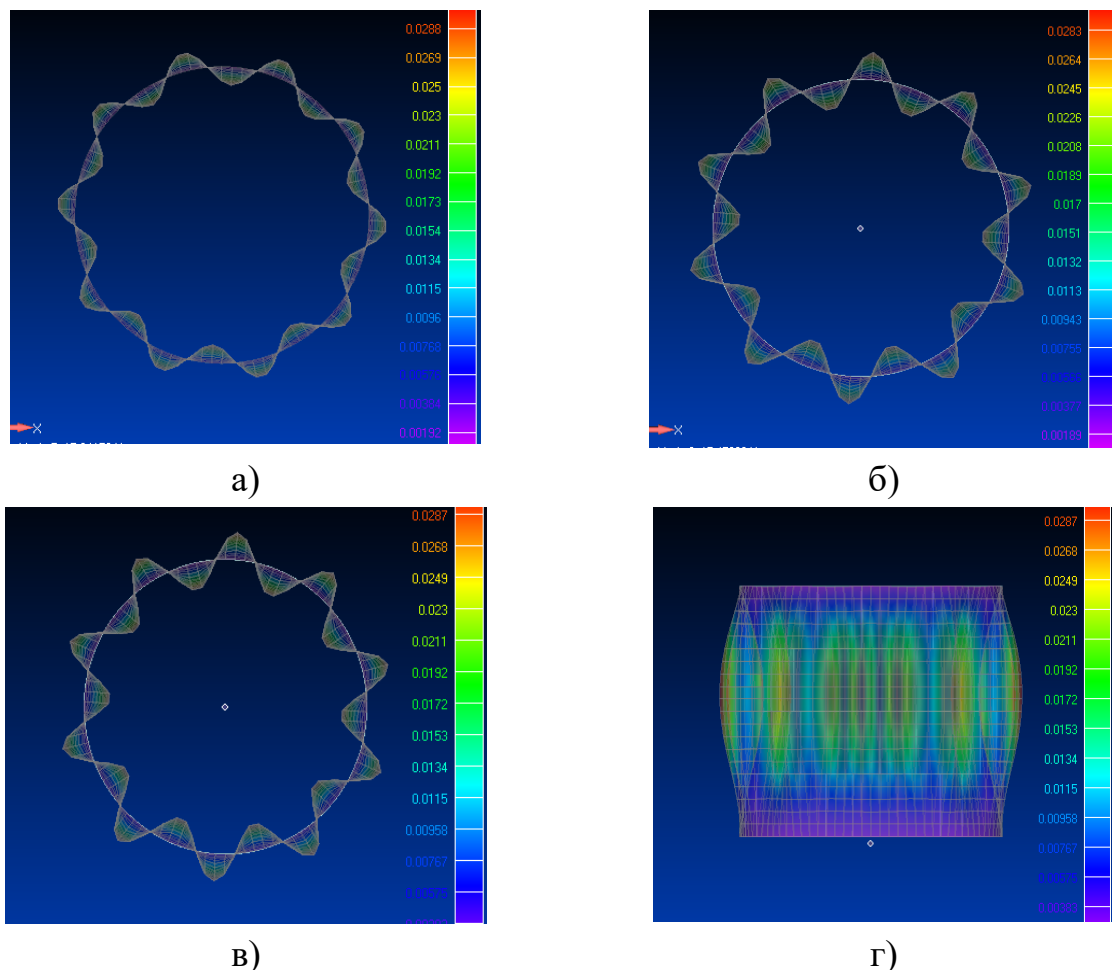


Рис. 3.8. Перші форми власних коливань з урахуванням корозії металу $\Delta=0,25$ мм: а) схема I (10 півхвиль); б) схема II (10 півхвиль); в) схема IV(10 півхвиль); г) схема IV уздовж твірної (1 півхвиля)

Досліджено вплив корозії металу стінки внутрішньої ємності резервуару на частоту за першою формою власних коливань, в результаті встановлено, що потоншення стінки у зазначеному діапазоні призводить до таких змін частоти відносно її значення без корозії:

- потоншення за схемою I – зменшення майже на 22%;
- потоншення за схемою II – зменшення на 8%;
- потоншення за схемою III – зменшення на 4%;
- потоншення за схемою IV – зменшення більше, ніж на 16%;
- потоншення за схемою V – зменшення більше, ніж на 8%;
- потоншення за схемою VI – зменшення більше, ніж на 2%.

Як видно, потоншення стінки внаслідок корозії за схемою I та за схемою IV має найбільший вплив на значення частоти власних коливань за першою формою.

Крім того, досліджено вплив наявності вертикальної та горизонтальної тріщин в зварних швах з відносним розміром $\Delta l/l = 0,02, \dots, 0,2$ на частоту власних коливань резервуару [34,42]. Результати дослідження частот і форм власних коливань показали, що форми власних коливань конструкції з тріщинами залишаються такими, як і для бездефектного резервуару. Кількість хвиль в радіальному та твірному напрямках не змінюється. У разі наявності тріщин у внутрішній ємності змінюються лише ті частоти власних коливань резервуару, на яких коливається внутрішня ємність. Аналогічний результат отримано і для випадку тріщини у зварних швах зовнішньої ємності. Наявність та розвиток тріщин призводить до зовсім незначного зменшення частот власних коливань. Максимальне зменшення частоти власних коливань внутрішньої ємності з вертикальною тріщиною складає 0,028%, з горизонтальною – 0,012%, зовнішньої ємності – відповідно 0,015% та 0,023%.

Проведено дослідження впливу тріщин на власні коливання при дії вертикального навантаження резервуару. Результати дослідження частот і форм власних коливань системи двох з'єднаних оболонок показали, що форми власних коливань конструкції з урахуванням тріщин залишаються такими, як і для конструкції без тріщин. Кількість хвиль в радіальному та твірному напрямках не змінюється. Величини зменшення частоти власних коливань резервуару є незначними, максимальне зменшення частоти власних коливань внутрішньої ємності з вертикальною тріщиною становить 0,015%, з горизонтальною – 0,003%, а зовнішньої ємності – відповідно 0,015% та 0,01%.

3.4. Аналіз впливу багатоосередкового пошкодження в зварних швах на параметри напружено-деформованого стану

У конструкціях резервуарів, які експлуатуються в умовах впливу комплексних навантажень є висока імовірність появи та розвитку багатоосередкового пошкодження (*multiple site damage – MSD*) в зварних з'єднаннях елементів конструкцій. Це може призвести до руйнування, що характеризується раптовим та швидкісним розповсюдженням за рахунок об'єднання між собою та поглинання невеликих за розміром тріщин [43,44].

Залишкова міцність конструкції з наявністю великої кількості концентраторів напруження (точок виникнення дефектів) не визначається довжиною одиничної, ізольованої тріщини, а залежить від сукупності дефектів в місцях з'єднань, поява тріщин в яких викликає перерозподіл напруження вздовж розтину та вимагає врахування впливу однієї тріщини на іншу [29,44].

3.4.1. Моделювання багатоосередкового пошкодження

Як і для попередніх досліджень, модель оболонки з багатоосередковим пошкодженням побудовано на основі методу скінченних елементів із застосуванням програмного комплексу NASTRAN. Для побудови використано всі наведені раніше характеристики реального резервуару. По колу оболонка розбита на 72 частини, по висоті – на 22. Для дослідження впливу багатоосередкового пошкодження було побудовано три моделі дефектів в зварних швах резервуару (розглядається одна ємність) [45]:

- перша – дві горизонтальні крізні тріщини в зварному шві першого пояса з довжинами, які одночасно збільшуються назустріч одна одній до утворення суцільної тріщини (рис. 3.9, а);
- друга – одна вертикальна і дві горизонтальні тріщини однакової довжини, які виникають послідовно одна за одною і розташовані в першому і другому поясах оболонки (рис. 3.9, б);

Тріщини в зварних швах моделюються за допомогою сукупності трикутних та чотирьохкутних плоских скінченних елементів. Ширина всіх тріщин дорівнює діаметру зварного шва 5мм. Довжина тріщин змінюється від 5% до 50% від максимальної довжини вертикального чи горизонтального шва.

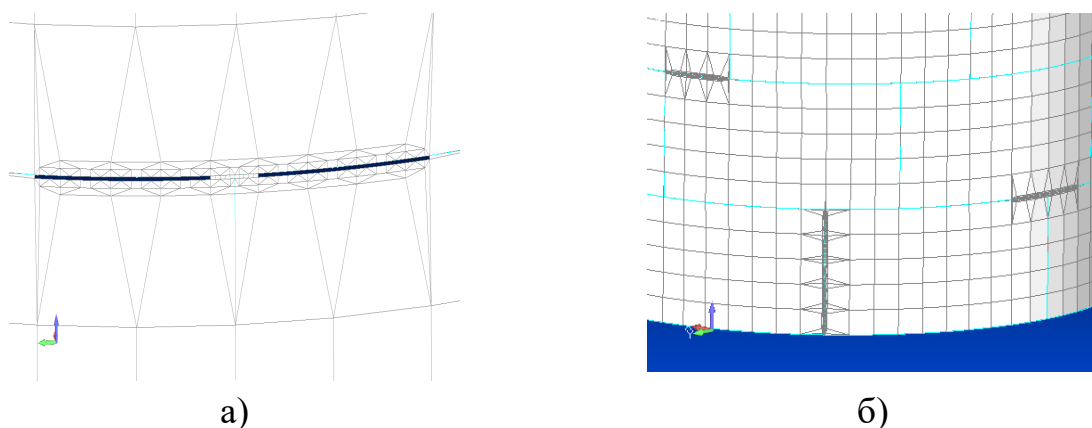


Рис. 3.9. Моделювання крізних тріщин в зварних швах ємності: а) перша модель; б) друга модель

Навантаження від ваги покрівлі ємності та огорожі моделюється у вигляді зосереджених сил, які прикладаються до вузлів верхньої кромки оболонки. Характеристичне значення навантаження на один вузол складає 680,14Н. При визначенні граничного розрахункового навантаження враховується коефіцієнт надійності за навантаженням $\gamma_f = 1,1$ та коефіцієнт відповідальності конструкції $\gamma_n = 1,2$ згідно [12]. Граничне розрахункове значення навантаження від ваги покрівлі та огорожі на один вузол ємності становить 897,78Н.

3.4.2. Напружено-деформований стан ємності з двома горизонтальними тріщинами в одному поясі

Дослідження виконано з послідовним однаковим збільшенням довжин двох горизонтальних тріщин назустріч одна одній до утворення однієї суцільної тріщини. Для оцінки впливу тріщин на стан оболонки спочатку для бездефектної оболонки було визначено максимальне напруження в елементах і максимальне переміщення вузлів моделі оболонки, які відповідно склали 1,392МПа і 0,018мм. Приклад впливу зміни довжини двох тріщин на напружено-деформований стан захисної ємності при дії вертикального навантаження представлено на рис. 3.10 [45]. Відносний розмір пошкодження $\Delta l/l$ для даного моделювання визначався як відношення сумарної довжини Δl двох горизонтальних тріщин, що розповсюджуються у зустрічному напрямку, до відстані l між крайніми початковими вершинами тріщин. Таким чином, вважаємо на етапі зародження тріщин параметр $\Delta l/l$ близьким до нуля, а при об'єднанні двох тріщин в одну – $\Delta l/l=1$.

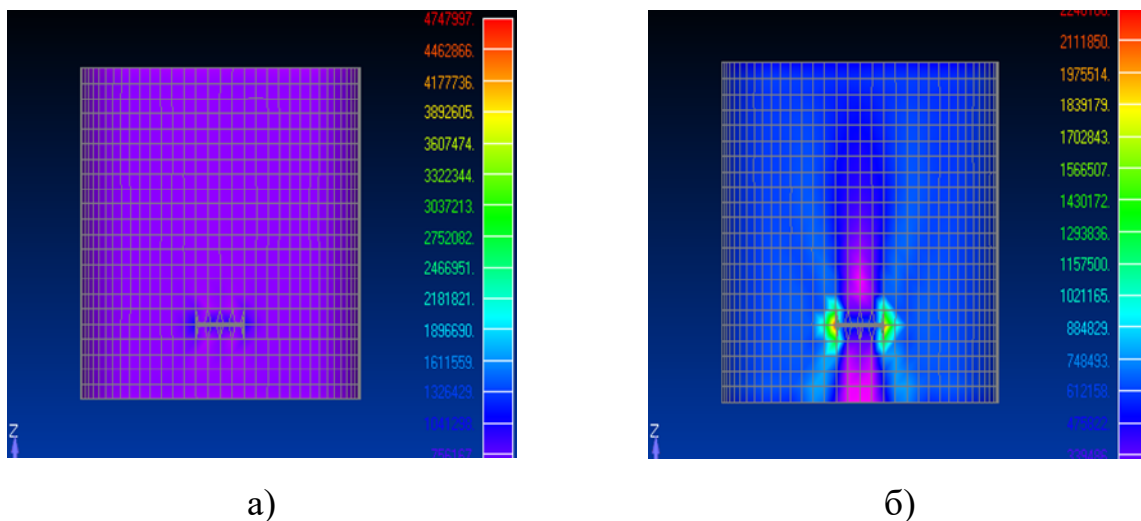


Рис. 3.10. Напруження в ємності при двох горизонтальних тріщинах в одному зварному шві з відносним розміром $\Delta l/l = 0,5$ (а) та $\Delta l/l = 1$ (б)

Максимальні напруження та переміщення в стінці ємності в залежності від відносного розміру двох горизонтальних тріщин наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Вплив двох горизонтальних тріщин в одному шві ємності на напружено-деформований стан

Характеристики НДС	Відносний розмір тріщин $\Delta l/l$					
	0,12	0,25	0,5	0,75	0,95	1
Напруження, МПа	1,778	1,622	2,038	3,285	10,706	2,925
Деформації, 10^{-5} м	1,897	1,899	1,904	1,929	2,632	9,156

Отримані результати свідчать про те, що при дії вертикального навантаження на ємність зі збільшенням довжини двох тріщин ($\Delta l/l = 0,12, \dots, 0,95$) спостерігається збільшення максимальних напружень в 6 разів і незначне збільшення максимальних переміщень у 1,4 разів. При утворенні суцільної горизонтальної тріщини в зварному шві ($\Delta l/l = 1$) спостерігається різке збільшення максимальних переміщень (близько 5 разів відносно початкового значення та близько 3,5 разів відносно значення перед об'єднанням тріщин). Максимальні напруження є більше ніж у півтора рази вищими за початкове значення, але зменшилися більше, ніж у 3,5 разів відносно значення перед об'єднанням тріщин.

3.4.3. Напружено-деформований стан ємності з вертикальними та горизонтальними тріщинами в різних поясах оболонки

Для дослідження напружено-деформованого стану оболонки побудовано модель з дефектами (рис. 3.9,б): одна вертикальна (L_1) і дві горизонтальні тріщини (L_2 , L_3) однакової довжини, які виникають послідовно одна за одною і розташовані в першому і другому поясах оболонки. На рис. 3.11 наведено скінчено-елементну модель ємності з тріщинами та схему з місцями можливого розташування сенсорів для вимірювання параметрів НДС оболонки [29,46].

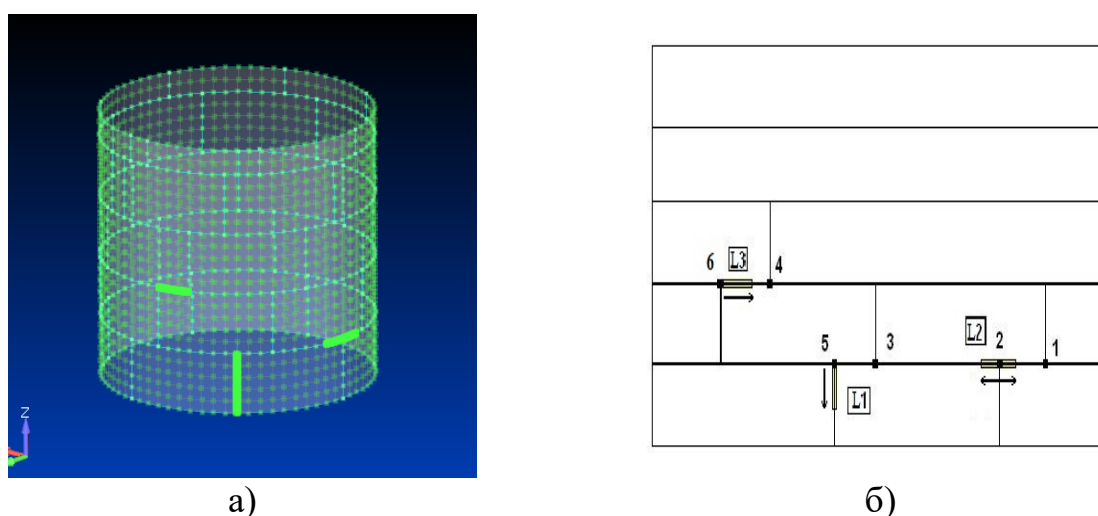


Рис. 3.11. Модель резервуару з тріщинами (а) та схема розташування тріщин і можливих місць встановлення сенсорів

Стрілками на рис. 3.11,б показано напрям поширення тріщин при їх розвитку. Вертикальна тріщина L_1 поширюється вниз до основи резервуару. Горизонтальна тріщина L_2 поширюється в обох напрямках, а L_3 поширюється вправо по зварному шву. Відносний розмір тріщин $\Delta l/l$ змінюється від 0 до 0,5, де Δl – довжина тріщини, l – довжина зварного шва, в якому поширюється тріщина. Всі шість сенсорів розташовані на зварних стиках поясів резервуару, зокрема, сенсори №1 та №4 розташовані у напрямку руху розвитку горизонтальних тріщин L_2 та L_3 відповідно, сенсори № 2, № 5, № 6 встановлені безпосередньо в центрах концентрації та утворення тріщин L_2 , L_1 та L_3 відповідно, а сенсор № 3 закріплено між L_1 та L_2 .

В табл. 3.8 наведено значення переміщень, а в табл. 3.9 – значення напружень в місцях встановлення сенсорів при бездефектному стані ємності та

окремому виникненні тріщин L_1 , L_2 , та L_3 з відносним розміром кожної $\Delta l/l=0,05$.

Таблиця 3.8

Значення переміщень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів

Переміщення в стінці резервуару з тріщинами, 10^{-06} м				
№ п/п датчиків	$\Delta l/l= 0$	$\Delta l/l= 0,05$		
		L_1	L_2	L_3
1	4,3894	4,3894	4,3999	4,3894
2	6,7712	6,7713	6,6182	6,7707
3	5,0387	5,0404	5,0396	5,0424
4	9,1720	9,1714	9,1723	9,2635
5	5,4059	5,4168	5,4065	5,3796
6	8,9472	8,9209	8,9201	8,8505

Таблиця 3.9

Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів

Напруження в стінці резервуару з тріщинами, МПа				
№ п/п датчиків	$\Delta l/l= 0$	$\Delta l/l= 0,05$		
		L_1	L_2	L_3
1	0,62116	0,62116	0,62121	0,62116
2	1,30410	1,30410	0,90778	1,30410
3	0,59157	0,59155	0,59162	0,59151
4	0,71968	0,71981	0,71975	0,70582
5	0,76733	0,83244	0,76725	0,76712
6	0,66661	0,66674	0,66683	1,25081

Як видно з наведених результатів, при появі малих тріщин переміщення в місцях встановлення усіх сенсорів є малими і практично не змінюються відносно бездефектного стану.

Інформативними при появі тріщин є напруження в місцях встановлення сенсорів №2 (для тріщини L_2), № 5 (для тріщини L_1) та №6 (для тріщини L_3), що може бути використано для моніторингу ТС резервуару, зокрема для локалізації пошкодження.

Проведено моделювання та визначено максимальні значення напружень в місцях встановлення сенсорів при появі та розвитку однієї тріщини L_1

(табл. 3.11), при одночасній появі та розвитку двох тріщин $L_1 + L_2$ (табл. 3.12) та одночасній появі та розвитку трьох тріщин $L_1 + L_2 + L_3$ (табл. 3.13).

Таблиця 3.11

Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів при появі та розвитку тріщини L_1

№ п/п сенсорів	Напруження в стінці резервуару, МПа				
	$\Delta l/l = 0$	$\Delta l/l = 0,05$	$\Delta l/l = 0,1$	$\Delta l/l = 0,2$	$\Delta l/l = 0,5$
1	0,62140	0,62116	0,62141	0,62145	0,62182
2	1,30410	1,30410	1,09380	1,09400	1,09460
3	0,59157	0,59155	0,60189	0,60268	0,59856
4	0,71968	0,71981	0,69143	0,69121	0,69117
5	0,76733	0,83244	0,97446	1,19560	1,46780
6	0,66661	0,66674	0,82045	0,82080	1,45710

Як видно з наведених в табл. 3.11 результатів, на появу та розвиток тріщини L_1 реагує сенсор №5, збільшення відносного розміру тріщини обумовлює однозначне збільшення напруження в місці встановлення сенсору №5. Для решти сенсорів змінювання напруження в місцях їх встановлення не є однозначним.

Таблиця 3.12

Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів при появі та розвитку двох тріщин $L_1 + L_2$

№ п/п сенсорів	Напруження в стінці резервуару, МПа				
	$\Delta l/l = 0$	$\Delta l/l = 0,05$	$\Delta l/l = 0,1$	$\Delta l/l = 0,2$	$\Delta l/l = 0,5$
1	0,62140	0,62142	0,62170	0,62459	0,67330
2	1,30410	0,81758	0,61915	2,55720	0,97679
3	0,59157	0,60238	0,60224	0,60412	0,61870
4	0,71968	0,72340	0,69156	0,69167	0,691571
5	0,76733	0,83219	0,97372	1,19590	1,51340
6	0,66661	0,66688	0,82040	0,82069	1,46660

Чутливими до появи та розвитку одночасно двох тріщин $L_1 + L_2$ є сенсори №2 (суттєве змінювання, але не однозначне) та сенсор №5 (табл. 3.12).

Таблиця 3.13

Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів при появі та розвитку трьох тріщин $L_1 + L_2 + L_3$

№ п/п сенсорів	Напруження в стінці резервуару, МПа				
	$\Delta l/l = 0$	$\Delta l/l = 0,05$	$\Delta l/l = 0,1$	$\Delta l/l = 0,2$	$\Delta l/l = 0,5$
1	0,62140	0,62146	0,62176	0,62488	0,67814
2	1,30410	0,81750	0,61922	2,5530	0,98487
3	0,59157	0,60234	0,60241	0,60493	0,63228
4	0,71968	0,72420	0,69189	0,69305	2,22080
5	0,76733	0,83215	0,97360	1,20310	1,60160
6	0,66661	1,25094	1,26486	1,35314	1,82342

Поява та розвиток одночасно трьох тріщин $L_1 + L_2 + L_3$ обумовлює змінювання максимальних напружень в місцях встановлення сенсорів №2, №5 та №6, в останньому випадку змінювання напружень є найбільш суттєвими – майже вдвічі появі одночасно трьох тріщин.

Отримані результати дозволяють обрати кількість і правильне розташування датчиків первинної інформації, за результатами вимірювання чи аналізу якої можна розпізнавати бездефектний стан резервуару та стани, які характеризуються появою та розвитком поодиноких і багато осередкових пошкоджень.

3.5. Динамічні характеристики резервуару при багатоосередковому пошкодженні

Модальний аналіз ємності з багатоосередковим пошкодженням виконано, як і у наведених в п.3.3 дослідженнях, за допомогою методу Ланцоша, що реалізований в програмному комплексі NASTRAN [37]. В результаті моделювання отримано частоти і форми власних коливань оболонки з тріщинами при їх одночасній появі та збільшенні відносних розмірів.

Спочатку розглянуто першу модель багатоосередкового пошкодження – дві горизонтальні тріщини в одному зварному шві, збільшення довжини яких призводить до їх об'єднання. На рис. 3.12 наведено перші форми власних коливань оболонки для відносного розміру тріщини $\Delta l/l=0,12$ та для $\Delta l/l=1$ при об'єднанні двох тріщин.

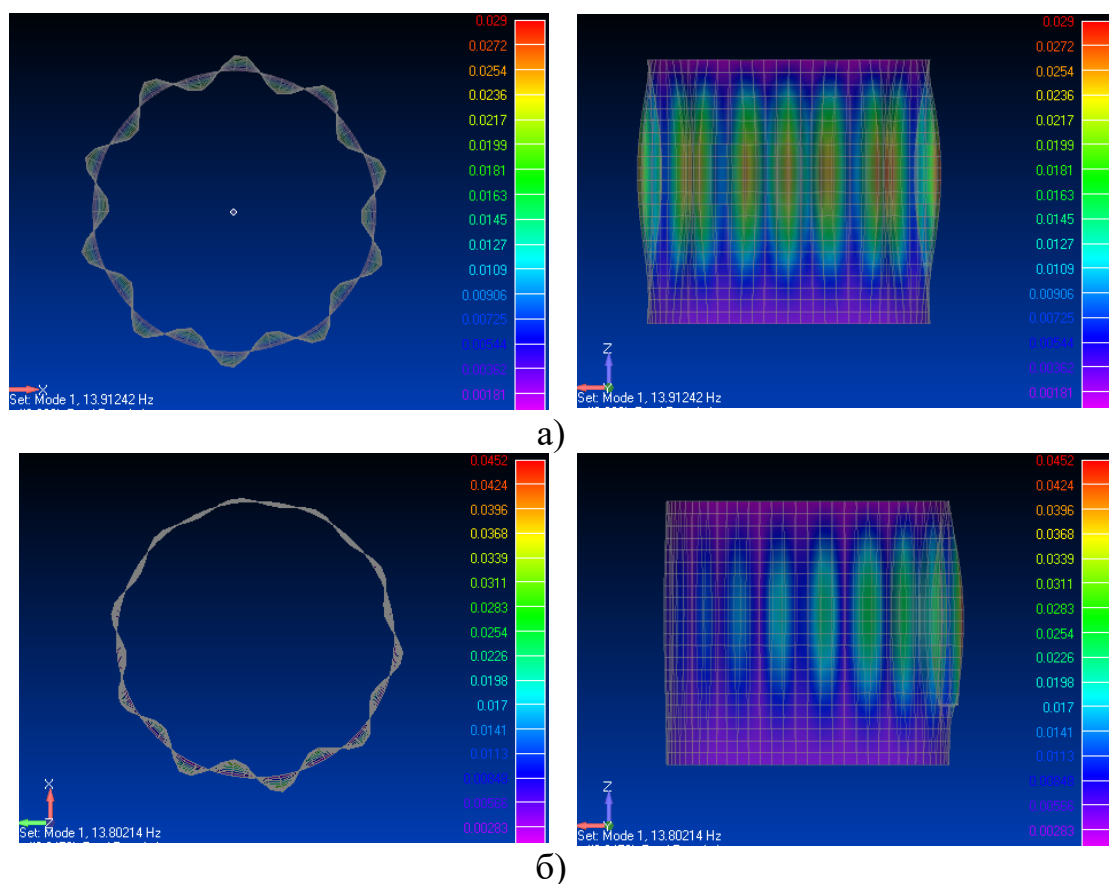


Рис. 3.12. Перша форма коливань резервуару з тріщинами для відносного розміру: а) $\Delta l/l=0,12$; б) $\Delta l/l=1$

Як видно, збільшення розмірів тріщин та їх об'єднання призводить до зміни першої форми коливань. Розрахунок частот за першими п'ятьма формами коливань показав їх незначне змінювання при збільшенні розмірів тріщин, зокрема, частота за першою формою власних коливань зменшується всього на 0,8% у розглянутому діапазоні змінювання відносного розміру $\Delta l/l$ від 0,12 до 1.

Для другої моделі багато осередкового пошкодження (одна вертикальна та дві горизонтальні тріщини) проведено модальний аналіз ємності у разі появи та розвитку одиначної тріщини L_1 , одночасної появи та розвитку двох тріщин $L_1 + L_2$ та одночасної появи та розвитку трьох тріщин $L_1 + L_2 + L_3$ при послідовному збільшенні відносного розміру тріщин [47].

Отримано та проаналізовано значення перших п'яти частот власних коливань і максимальні відносні переміщення вузлів моделі при послідовному виникненню тріщин зі збільшенням їх довжини. Для відносних розмірів тріщин $\Delta l/l=0,1, \dots, 0,2$ власні частоти за розглянутими формами коливань мають незначні змінювання як при збільшенні відносного розміру тріщин, так і

при збільшенні їх кількості. Зокрема, для першої форми коливань частота зменшується на 0,003% для однієї тріщини, на 0,008% для одночасної появи і розвитку двох тріщин, та на 0,05% для одночасної появи та розвитку трьох тріщин. Збільшення відносного розміру тріщин до значення $\Delta l/l=0,5$ призводить до зменшення власної частоти за першою формою коливань на 0,07% у разі розвитку однієї тріщини, на 0,14% для двох тріщин, та на 0,8% для трьох тріщин [47].

Максимальні відносні переміщення вузлів моделі значно зростають як при збільшенні кількості тріщин, так і при збільшенні їх відносних розмірів. Зокрема, в розглянутому діапазоні значень $\Delta l/l$ максимальні відносні переміщення вузлів моделі за першою формою коливань зростають майже на 6% при розвитку однієї тріщини L_1 , майже на 10% при одночасному розвитку двох тріщин $L_1 + L_2$, та на майже 56% при одночасному розвитку трьох тріщин $L_1 + L_2 + L_3$.

Врахування дії вертикального навантаження від ваги покрівлі та обладнання показало, що зміна власних частот коливань при послідовному виникненні тріщин і їх розвитку є більшою, ніж без урахування впливу навантаження, але теж незначною (не перевищує 1,5%). При дії статичного вертикального навантаження значне збільшення максимальних вузлових переміщень по власних формах коливань спостерігається для всіх розглянутих відносних розмірів і кількостей тріщин в зварних швах, що важливо для їх виявлення.

4. СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СИНТЕЗ СИТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РЕЗЕРВУАРУ

Розроблені за останнє десятиріччя методи, методики та технології діагностування як окремих елементів конструкцій, так і складних динамічних об'єктів, дозволяють створити діагностичні системи нового класу - комплексні інтелектуальні системи моніторингу ТС конструкцій в експлуатації, які за принципами побудови та функціонування можна віднести до систем, що реалізують концепцію SHM. Для розробки системи моніторингу ТС елементів конструкцій об'єкту в експлуатації необхідно вирішити такі завдання [32]:

- формування переліку вимог та технічних умов до системи моніторингу на основі аналізу інформації про контрольований об'єкт, умови його експлуатації, потенційні небезпечні дефекти конструкції та їх вплив на параметри технічного стану об'єкта;
- розробка методологічного забезпечення структурного моніторингу конструкцій: обґрунтування, розробка, вдосконалення методів та засобів контролю та діагностики для забезпечення неперервного поточного комплексного аналізу та ідентифікації технічного стану;
- структурно-функціональний синтез системи: обґрунтування, розробка та вдосконалення датчиків первинної інформації - чутливих елементів системи, перетворювачів, засобів зв'язку, засобів обробки інформації; формування вимірювальних каналів, оптимізація структури системи;
- розробка центрального діагностичного серверу, формування інформаційної мережі для передачі діагностичних даних на центральний діагностичний сервер та створення відповідних інтерфейсів;
- розробка алгоритмів обробки діагностичної інформації для окремих модулів системи, розробка алгоритмів оцінювання та прийняття рішення про експлуатаційні навантаження та технічний стан контрольованого об'єкту.

За умови встановлених діагностичних завдань та визначених методів контролю і діагностики, що є найбільш прийнятними для моніторингу ТС конкретного об'єкту, ефективність структурного моніторингу обумовлюється

такими факторами, як: структура системи моніторингу; характеристики вимірювальних каналів; методи та алгоритми аналізу.

4.1 Загальна структура системи моніторингу та функціональної діагностики резервуарів

Дослідження резервуару, як об'єкта моніторингу, показало, що моніторинг ТС резервуарів з екологічно-небезпечними речовинами потребує комплексного підходу на основі:

- розробки та застосування діагностичних моделей об'єкта для визначення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану в реальних умовах експлуатації;
- обґрунтування методів і технічних засобів контролю та діагностики, які будуть найбільш ефективними для даного об'єкта та проявів тих дефектів і пошкоджень, що несуть загрозу його руйнування.

На основі розвитку та комплексного використання методів і засобів неруйнівного контролю та діагностики, поєднанні специфічних математичних моделей і методів оперативної ідентифікації вібраційних, деформаційних та міцнісних процесів в умовах безпосередніх вимірювань розроблено та запатентовано автоматизовану систему функціональної діагностики [48].

В основу даної системи покладено комплексний підхід до проблеми контролю функціонального стану резервуарів з паливом в складних кліматичних умовах експлуатації, який забезпечує [2,3,48]:

- отримання, аналіз та використання інформації про реальний вібраційний стан конструкції резервуару;
- створення та аналіз математичної моделі резервуару з урахуванням реальних умов динамічних та статичних навантажень для визначення характеристик стійкості та напружень конструкції резервуару;
- отримання інформації про зміну ТС;
- збір та аналіз інформації про вібраційний стан фундаменту, на якому встановлено резервуар, про просторове положення резервуару для визначення ознак зміни динамічного та статичного навантаження на конструкцію резервуару;
- автоматизацію процесу збору, перетворення, зберігання, візуалізації та аналізу діагностичної інформації для прийняття рішення про

поточний функціональний стан резервуару та прогнозування його динаміки.

Узагальнену функціональну схему комплексної системи структурного моніторингу резервуару наведено на рис. 4.1.

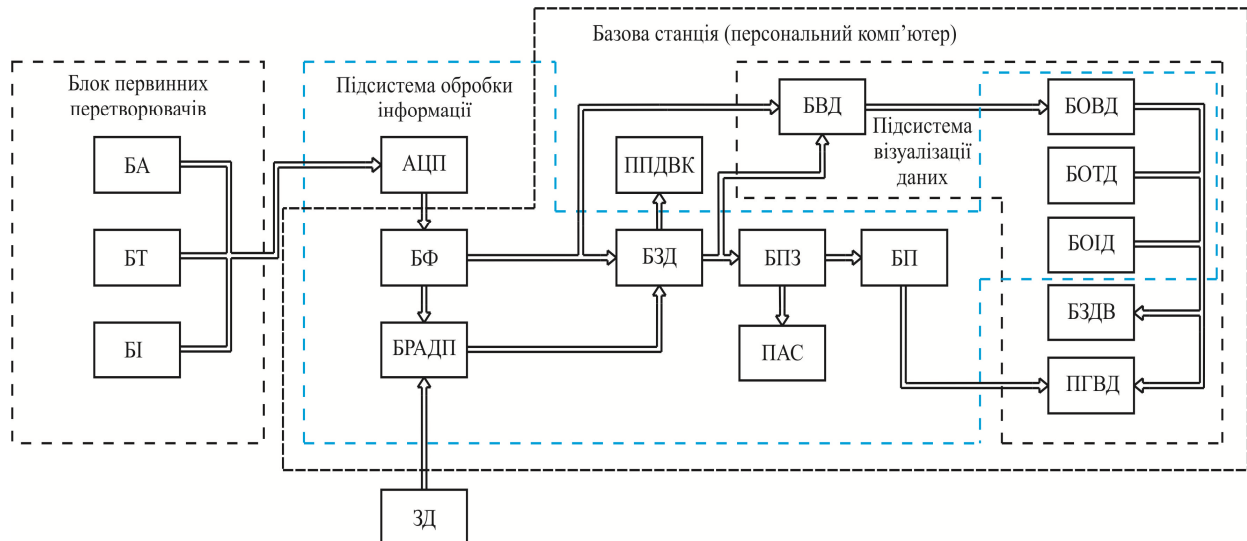


Рис. 4.1. Узагальнена функціональна схема системи моніторингу:

БА, БТ, БІ – блоки акселерометрів, тензорезисторів та інклінометрів відповідно; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; БФ – блок фільтрів; БРАДП – блок розрахунку та аналізу діагностичних параметрів; ЗД – зовнішні дані; БЗД – блок збереження даних; ППДВК – пристрій передачі даних віддаленому користувачу; БПЗ – блок порогових значень; ПАС – пристрій аварійної сигналізації; БП – блок прогнозу; БВД – блок вибору даних; БОВД, БОТД, БОІД – блоки обробки вібраційних, тензометричних та інклінометричних даних відповідно; БЗДВ – блок збереження даних візуалізації; ПГВД – блок графічного відображення даних

Наведена схема пояснює принцип функціонування розробленої системи [3]:

- блоком акселерометрів БА, блоком тензорезисторів БТ, блоком інклінометрів БІ здійснюється знання та реєстрація даних про вібраційний, напружено-деформований стан та просторове положення, які за допомогою АЦП перетворюються у цифровий сигнал;
- цифрові сигнали фільтруються у блоці фільтрів БФ для виділення інформативних складових сигналу;

- відфільтрований сигнал надходить до блоку розрахунку та аналізу діагностичних параметрів БРАДП, в якому проходить обробка вимірюваних сигналів відповідними методами, визначення діагностичних ознак, розрахунок параметрів ТС; при необхідності в блок розрахунку вводяться зовнішні дані ЗД, наприклад, величина динамічних збурень, що діють на резервуар, ці дані можуть передаватися як у вигляді файлів так і в потоковому режимі від зовнішньої системи;

- дані з блоку фільтрів БФ, блоку розрахунку та аналізу діагностичних параметрів БРАДП надходять до блоку збереження даних БЗД, де зберігаються у вигляді файлів з унікальними іменами;

- файли з даними вимірювань з блоку збереження даних БЗД можуть бути передані за допомогою пристрою передачі даних віддаленому користувачу ППДВК;

- файли з даними вимірювань з блоку збереження даних БЗД надходять до блоку порогових значень БПЗ, де проходить порівняння величини діагностичних параметрів з їх пороговими значеннями;

- у випадку, коли діагностичні параметри перевищують свої граничні значення спрацьовує пристрій аварійної сигналізації ПАС;

- у блоці прогнозу БП відбувається накопичення значень діагностичних параметрів та побудова часових залежностей у вигляді трендів з екстраполяцією результатів для кожного окремого діагностичного параметра;

- з блоку фільтрів БФ та блоку збереження даних БЗД сигнали та файли з даними надходять до блоку вибору даних БВД, який у залежності від рішень людини-оператора визначає у якому вигляді буде проходити їх візуалізація, а саме: в он-лайн режимі або шляхом зчитування даних з файлу для більш детального їх аналізу;

- у блоці обробки вібраційних даних БОВД за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення проходить частотний та частотно-часовий аналіз сигналів вібрації з формуванням графічних звітів у вигляді графіків, таблиць, тощо;

- у блоках обробки тензометричних (БОТД) та інклінометричних (БОІД) даних за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення проходить формування імітаційної моделі ОК для відображення на ній величини напружень та кутового положення, а також формування графічних звітів у вигляді графіків, схем, таблиць, тощо;

- блок збереження даних візуалізації БЗДВ призначений для збереження окремих графіків та рисунків для подальшого дослідження та порівняння;
- дані з блоку прогнозу БП, блоку обробки вібраційних даних БОВД, блоків обробки тензометричних (БОТД) та інклінометричних (БОІД) даних передаються на пристрій графічного відображення даних ПГВД, в якому відбувається візуалізація даних вимірювань у вигляді графіків, діаграм та імітаційних моделей.

Канали зв'язку (вимірювальні канали) є основою будь-якої діагностичної системи, необхідні характеристики каналів формуються шляхом раціонального вибору елементів і значною мірою залежать від типів датчиків первинної інформації та місць їх установки на об'єкті. У сучасних системах функціональної діагностики використовуються датчики для реєстрації різних фізичних процесів, які є реакцією матеріалу конструкції на вплив, що призводить до пошкодження. Головними вимогами до датчиків первинної інформації є вимоги точності, чутливості, високої надійності, мініатюрності та можливості бути інтегрованими в конструкцію об'єкта. Можливість використання конкретного типу датчика визначається не тільки відповідністю зазначеним вище вимогам, а й з урахуванням специфіки об'єкта. Так, для вертикального сталевого зварного резервуару та для розробленої системи структурного моніторингу запропоновано такі вимірювальні канали та відповідні датчики: канал аналізу вібраційного стану об'єкта (акселерометри); канал оцінки параметрів напружено-деформованого стану (тензорезистори); канал оцінки просторового положення об'єкта (інклінометри).

Для резервуарів з наземним фундаментом при комплексуванні акселерометра та інклінометра з подальшим їх встановленням на фундаменті можна визначити величину малих лінійних переміщень фундаменту за наступною методикою [3]:

- вимірювачі віброприскорень (акселерометри) та просторового положення (інклінометри) встановити в одній площині на елементі конструкції об'єкта;
- виміряти кут відхилення площини установки вимірювача від площини горизонту;
- сигнал віброприскорення скорегувати на величину, пропорційну кутовому відхиленню;

- сигнал віброприскорення посилити, відфільтрувати у необхідній смузі частот та шляхом інтегрування перетворити у сигнал віброшвидкості;
- сигнал віброшвидкості посилити, відфільтрувати в необхідній смузі частот та шляхом інтегрування перетворити в сигнал вібропереміщення;
- сигнал вібропереміщення додатково відфільтрувати у необхідній смузі частот з максимальним коефіцієнтом згасання в смузі затримки та посилити на величину, визначену експериментально при відомих значеннях переміщень.

Такий підхід дозволяє визначити не тільки величину лінійних переміщень фундаменту, а й причину їх виникнення (зміна лінійного або кутового положення), що можна вважати достатнім для практичного використання.

Метою моніторингу в розробленій системі є не тільки розв'язання діагностичних завдань для визначення поточного ТС резервуару, а й вирішити задачу прогнозування майбутнього технічного стану резервуару на ранніх стадіях розвитку руйнівних процесів в елементах конструкцій (на основі побудови трендів з екстраполяцією результатів для кожного окремого діагностичного параметра), а також реалізувати комплекс превентивних заходів по попередженню руйнування об'єкта.

4.2. Датчики первинної інформації системи моніторингу

За звичай в системах моніторингу та функціональної діагностики типи та кількість вимірювальних каналів підбираються таким чином, щоб вони задовольняли наступним вимогам [16]:

- зони, підконтрольні конкретним датчикам, повинні покривати максимально можливий об'єм, або площу контролюваного об'єкта;
- кількість і місця встановлення датчиків повинні бути достатніми для отримання найбільш повної картини полів розподілу контролюваного параметра за результатами аналізу вимірюваної інформації;
- датчики повинні бути розміщені таким чином, щоб дані одного типу датчиків можна було зіставити з даними іншого типу датчиків з подальшими висновками про ступінь кореляції різних параметрів;
- кількість датчиків повинна бути мінімізована з точки зору витрат на створення системи моніторингу;

- конфігурація мережі датчиків повинна забезпечувати окрім локального контролю параметра в зоні вимірювального вузла, можливість оцінювати глобальні характеристики конструкції об'єкта;
- вибір місць установлення датчиків найкраще проводити за даними, отриманими в процесі моделювання або шляхом аналізу зон виникнення дефектів на подібних об'єктах.

Наведемо загальну характеристику датчиків первинної інформації для зазначених вище каналів комплексної системи структурного моніторингу резервуарів.

4.2.1. Датчики вібрації

Датчики вібрації (віброметри) – прилади, призначені для визначення параметрів вібраційних явищ, найчастіше це вібраційна швидкість, вібраційне прискорення та вібраційне переміщення [49].

Загальна схема датчика вібрації містить два основних блоки: віброперетворювач і блок обробки. Функціональне призначення першого блоку – перетворення механічних вібрацій в електричний сигнал, для чого використовуються такі основні механізми перетворення, як: п'єзоелектричний; вихрострумний; ємнісний; індукційний; оптичний.

Механізм перетворення значною мірою визначає як характеристики приладу, так і його вартість.

Другий блок – електронний блок обробки – призначений для «розшифровки» отриманого сигналу. На вході таких блоків стоїть аналогово-цифровий перетворювач, і основна частина операцій над сигналом проводиться в цифровому вигляді, що розширює функціональні можливості процесу обробки, підвищує завадостійкість і дозволяє здійснювати вивід інформації із зовнішнього інтерфейсу.

При використанні на виробництві стаціонарні віброметри можуть входити до складу регулюючих систем як датчики зворотного зв'язку. Для цих цілей деякі моделі віброметрів мають аналоговий вихідний сигнал (за звичай це напруга). Для одержання більш повної характеристики вібраційного процесу до складу вимірювальної системи може бути доданий аналізатор спектру вібрації.

Більшість сучасних віброметрів відноситься до одного з двох типів: п'єзоелектричні/ємнісні та оптичні. Наведемо загальну характеристику цих типів датчиків.

- **П'єзоелектричні віброметри**

В основу роботи даного типу приладів покладено п'єзоэффект – явище виникнення різниці потенціалів на п'єзокристалі при його механічній деформації [50,51]. Усередині корпусу віброметра утримується інертне тіло, підвишене на пружних елементах, що містять п'єзоелектричний матеріал. Якщо корпус приладу прикріплений до віброуючої поверхні, пружні елементи зареєструють коливання інертного тіла, що не прикріплено безпосередньо до корпусу, а тому прагне зберігати своє первісне положення. У цілому, у даній конфігурації п'єзоелектричний віброметр є не що інше, як акселерометр, і часто досить складно провести межу між цими видами первинних перетворювачів.

Електричний сигнал з п'єзокристалу подається на АЦП і його обробка здійснюється в цифровому вигляді. Основним призначенням прийомного чутливого блоку є перетворення вібрації в електричний сигнал, а характер його подальшої обробки визначається параметрами цифрової електронної схеми.

Основним недоліком цього класу приладів є необхідність контакту чутливої частини з вимірюваним об'єктом, що не завжди доречно на практиці. Крім того, п'єзоелектричні прилади мають більш вузький діапазон частот, оскільки мають механічний тракт передачі вібрації, де максимальна частота визначається інертністю компонентів.

До переваг п'єзоелектричних віброметрів можна віднести їх відносно невисоку вартість, а також відносну простоту пристрою, що забезпечує надійність і стійкість до зовнішніх впливів.

Найбільше застосування у вібродіагностиці мають п'єзоелектричні, п'єзорезистивні акселерометри і акселерометри зі змінною ємністю.

П'єзоелектричні акселерометри [50,51].

Використовують пружинно-масову систему для генерації сили, еквівалентної амплітуді і частоті вібрації. Ця сила прикладається до п'єзоелектричного елемента, який створює на своїх виходах заряд, пропорційний вібраційному переміщенню. Конструкція п'єзоелектричних акселерометрів забезпечує одночасно високий сейсмічний резонанс і міцність, тому акселерометри даного типу є універсальними акселерометрами загального призначення. Їх виняткові високочастотні характеристики також ідеально

підходять для вимірювання високочастотних вібрацій. П'єзоелектричні матеріали є самогенеруючими і тому не вимагають зовнішнього джерела енергії. Вони здатні працювати при екстремальних температурах, але їх відрізняє низька вихідна чутливість (що характерно для конструкції пружинно-масового датчика). П'єзоелектричні акселерометри бувають двох типів: з зарядним вихідним сигналом і з вихідним сигналом по напрузі. Акселерометри з зарядним виходом мають переваги, зокрема, це можливість роботи при високих температурах і в широкому діапазоні амплітуди, який визначається налаштуваннями підсилювача заряду. Акселерометри по напрузі мають фіксований діапазон амплітуди.

П'єзорезистивні акселерометри [50,51].

Датчики деформації п'єзорезистивних акселерометрів змінюють електричний опір пропорційно прикладеній механічній напрузі. Монолітний датчик акселерометра містить вбудовані механічні обмежувачі і має дуже високу міцність при дуже хорошому співвідношенні сигнал/шум. Акселерометри цього типу ідеально підходять для вимірювання переміщення, низькочастотної вібрації і ударної дії. Їх можна також використовувати для ударних випробувань легких систем або конструкцій. Ці акселерометри ідеально підходять для вимірювання тривалих перехідних процесів, а також короткочасних ударних дій. У багатьох випадках чутливість виявляється досить високою і попереднє підсилення вихідного сигналу не вимагається. П'єзорезистивні акселерометри мають мінімальне демпфірування, тому не створюють фазового зсуву на низьких частотах.

Акселерометри змінної ємності [50,51].

В акселерометрах змінної ємності унікальний мікродатчик змінної ємності створює ємнісний пристрій з паралельним розташуванням пластин. В результаті виходить датчик з реакцією на вхідні прискорення постійного струму, із стабільною характеристикою демпфування, яка максимізувала частотну характеристику, і з достатньою міцністю, щоб протистояти дуже високим ударним і прискорювальним навантаженням. Ці акселерометри ідеально підходять для вимірювання переміщень і низькочастотних вібрацій. Але ємнісні датчики вимагають використання спеціальних кабелів з малим рівнем шуму, ціна яких значно перевищує ціну на стандартні коаксіальні кабелі. Для підключення датчиків також необхідні підсилювачі заряду і лінійні конвертери.

Згідно ГОСТ Р ІСО 5348-99 для ефективної експлуатації акселерометра необхідно виконання таких умов:

- а) акселерометр повинен відтворювати, наскільки це можливо, рух випробовуваної конструкції в місці установки акселерометра;
- б) установка акселерометра повинна мінімально впливати на коливання конструкції;
- в) відношення сигналу з виходу акселерометра до сприйманих їм коливань не має бути спотворене впливом власної резонансної частоти встановленого акселерометра.

Для реалізації вказаних принципів необхідно виконати наступні вимоги:

- а) акселерометр і його кріплення мають бути максимально жорсткими і твердими, а поверхня кріплення – максимально чистою;
- б) саме кріплення повинне вносити мінімальні спотворення до руху конструкції, для чого рекомендується використання симетричних кріплень;
- в) маса акселерометра разом з пристроєм кріплення має бути мала порівняно з динамічною масою конструкції.

- **Оптичні датчики вібрації**

В основу роботи оптичного віброметра подібно ультразвуковим датчикам переміщення покладений ефект Доплера [52]. Прилад зазвичай містить лазерне джерело випромінювання, приймальну оптичну схему, а також електронну схему обробки. При відбитті випромінювання від нерухомого об'єкта довжина хвилі прийнятого променя не відрізняється від істинної довжини хвилі лазера. Якщо об'єкт переміщується уздовж осі випромінювання, відбувається зсув довжини хвилі відбитого випромінювання на деяку величину (ефект Доплера), значення й знак якої несуть інформацію про швидкість і напрямок руху об'єкта, а використовувана в складі прийомного оптичного модуля інтерферометрична схема дозволяє визначити цю величину. Таким чином, коливання поверхні, від якої відбивається промінь, модулюють частотний зсув, і електронна обробка сигналу модуляції дозволяє отримати параметри вібраційних коливань.

Однією з основних переваг оптичних віброметрів є можливість проведення безконтактних вимірювань, при їх використанні в стаціонарному вимірювальному комплексі потрібно лише одноразове фокусування на вимірюваній поверхні. Крім того, пристрої цього типу мають високу точність і швид-

кодую, оскільки позбавлені рухомих елементів. До недоліків можна віднести досить високу ціну.

4.2.2. Тензометричні датчики

Тензометрія – це сукупність експериментальних методів визначення механічного напруження елемента конструкції, яка ґрунтується на визначенні деформацій або інших змін параметрів матеріалу, викликаних механічним напруженням [53]. Прилади для вимірювання деформацій називаються тензометрами, які за принципом дії діляться на електричні, оптичні, пневматичні, акустичні. До складу тензометра входить тензометричний датчик і пристрої, що показують (індикатори) та/або пристрої, що реєструють результат вимірювання.

На практиці є багато різних способів вимірювання деформацій, кожен з них має свої переваги й недоліки, тому вибір того або іншого методу залежить від поставленої задачі.

Оптичний – на основі вимірювання малих зсувів поверхонь, які реєструються, наприклад, інтерференційними методами, методами муарових візерунків та ін. Для дослідження деформацій оптично прозорих деталей застосовують методи, засновані на ефекті виникнення подвійної променезаломлюваності або обертанні площини поляризації в навантажених деталях. Для цього деталь поміщають між схрещених поляризаторів, а у світлі, що проходить через них, спостерігають візуалізовану картину напружень (за звичай, так вивчають деформації оптично прозорих макетів деталей) [54].

Пневматичний – ґрунтується на вимірюванні тиску стисненого повітря в соплі, що зв'язане з поверхнею досліджуваної деталі. Зміна відстані до сопла від поверхні викликає зміну тиску, що реєструється приладом.

Акустичний – коли при навантаженні елементів конструкцій змінюються акустичні параметри матеріалу (швидкість звуку, акустичний опір, згасання), ці зміни можуть бути виміряні п'єзоелектричними датчиками. Також акустичні методи використовуються в датчиках, при навантаженні яких змінюється частота власних коливань чутливого елемента (наприклад, в струнних)

Електричний – використовує зміну електричних параметрів матеріалу чутливого елемента тензодатчика при навантаженні, зазвичай зміну електричного опору (в тензорезистивних датчиках) або напруги, що генеруються,

при деформаціях (в п'єзоелектричних). Умовно до електричних методів можна віднести різні електричні вимірювання малих зсувів в ємнісних, індукційних та ін. датчиках.

Серед зазначених методів для контролю конструкцій найчастіше застосовуються електричний та акустичний. Розглянемо детальніше первинні перетворювачі (тензодатчики), що використовуються при реалізації цих методів.

Тензометричний датчик – це прилад, який призначений для перетворення механічної деформації твердого тіла, що викликається механічними напруженнями, в сигнал (зазвичай електричний) [53,55]. Широке коло задач й умов проведення вимірювань обумовило номенклатуру тензометрів, що відрізняються за призначенням та принципом роботи. Розглянемо два типи тензометрів: механічні й електричні. Останні, за принципом дії (визначається типом чутливого елементу) підрозділяються на резистивні, струнні, ємнісні, індуктивні.

Тензометричні датчики механічного типу працюють на основі прямої залежності лінійного подовження випробуваного зразка від напружень у його поперечному перерізі при дії деформуючого навантаження [56].

Тензометричні датчики резистивного типу у якості чутливого елементу використовують тензорезистори, принцип дії яких ґрунтується на зміні електричного опору при деформації їх разом з виробом (тензорезистор являє собою відрізок тонкого дроту, покладений змійкою на ізоляційній основі). Для збільшення чутливості в тензометрах використовують по декілька тензорезисторів, що вмикають за мостовою схемою.

Тензометричні датчики струнного типу чутливим елементом мають відрізок сталевого дроту, що закріплений всередині трубки, частота коливань дроту (струни) залежить від його (її) натягу. Встановлюється датчик на поверхні контрольованого виробу шляхом приварки шаблона, за допомогою болтових з'єднань або клею. Датчик є виробом багаторазового використання, інформація передається за допомогою кабелю.

Тензометричні датчики ємнісного типу у якості чутливого елемента використовують конденсатори змінної ємності. Принцип роботи цього типу тензометрів ґрунтується на залежності ємності конденсатора від величини зазору між його пластинами.

Тензометричні датчики індуктивного типу у якості чутливого елементу використовують котушку індуктивності з рухомим сердечником. Котушка

індуктивності закріплюється нерухомо на об'єкті, а рухомий сердечник з'єднаний з об'єктом через рухливу призму або ніж і змінює своє положення під впливом деформуючої сили. Це переміщення призводить до зміни індуктивності або взаємної індуктивності котушки. Залежність електричних параметрів котушки індуктивності від положення її рухливого елемента покладено в основу роботи тензометрів цього типу.

4.2.3. Інклінометри

Інклінометр – пристрій, призначений для вимірювання кута нахилу різних об'єктів, відносно гравітаційного поля Землі. На статичних об'єктах (наприклад, спорудах, будівлях) інклінометр вимірює кутові характеристики їх просторового положення [57].

Розрізняють три основні групи датчиків нахилу, це одновісні, двовісні і трьохвісні. За принципом своєї роботи вони дуже нагадують акселерометри. Акселерометр можна застосовувати як для вимірювання проекцій абсолютного лінійного прискорення, так і для непрямих вимірювань проекції гравітаційного прискорення, що діє на інерційну масу. Остання властивість використовується для створення інклінометрів. Для визначення просторового положення об'єкта окрім інклінометрів можна застосовувати акселерометри, в основному це двовісні, для визначення відхилення геометричної площини об'єкта відносно вектору сили гравітації. В залежності від способу зняття даних про переміщення інерційної маси розрізняють такі основні типи акселерометрів та інклінометрів: тензометричні; п'єзоелектричні; ємнісні напівпровідникові.

Датчики, в яких використовуються тензометричний спосіб, досить об'ємні, мають низьку відтворюваність, погану стійкість до ударних впливів і малу довговічність. Значно кращими є характеристики п'єзоелектричних датчиків прискорення, у яких фізична деформація кристалічної структури призводить до зміни її провідності. Однак найкращі характеристики мають ємнісні напівпровідникові датчики, у яких пластини, що рухаються паралельно, утворюють змінний конденсатор. Перевагами таких датчиків є: низька вартість завдяки масовому виробництву; можливість виконання додаткових функцій (само тестування, зміна діапазону вимірювань); висока відтворюваність; висока стійкість до ударних впливів і перевантажень; функціональна завершеність (сенсор і схема обробки розташовуються на одному кристалі);

мініатюрність; висока чутливість; простота калібрування; широкий діапазон робочих температур.

4.3. Керування процесом моніторингу

Коректне та ефективне функціонування системи структурного моніторингу значною мірою залежить від структури організації і керування процесом моніторингу та діагностики.

Основними модулями в системі, які відповідають за організацію та керування є АЦП і ПК, за допомогою яких програмними засобами можна налаштувати параметри роботи системи.

Система моніторингу призначена для експлуатації в режимі реального часу, вона є багатоканальною, що обумовлює такі завдання організації та керування [55]:

- синхронізація усіх вимірювальних каналів;
- забезпечення високої надійності передачі даних;
- обробка досить великих обсягів інформації в режимі реального часу;
- попередження про небезпеку.

Питання синхронізації вирішується за допомогою АЦП, який входить в систему й має функцію синхронізації вхідних каналів. Вона реалізується за допомогою сигнального процесора, який подає синхроімпульс до входів АЦП.

Забезпечення високої надійності передачі даних реалізується декількома методами:

- перший метод реалізується апаратно і полягає у використанні попередніх підсилювачів на датчиках та добре захищених лініях зв'язку;
- другий метод реалізується програмно і полягає у використанні для організації передачі даних Ethernet технології, яка передає дані пакетами, її каналний рівень моделі OSI реалізує функцію виявлення та корекції помилок (повторно передає пошкоджені кадри).

При обробці великих обсягів інформації слід звернути увагу на те, яка саме інформація і в якій кількості необхідна. Мова йде про частоту опитування каналів вимірювання. В системі використовується АЦП, який має вбудовану функцію для налаштування частоти опитування кожного з вхідних каналів.

Час опитування датчиків залежить від динаміки розвитку дефектів, викликаних динамічними збуреннями та статичними навантаженнями. Розвиток дефектів (руйнування) відбувається поступово або швидкоплинно. Швидкоплинний розвиток дефектів та пошкоджень виникає при дії на об'єкт навантажень, що перевищують розрахункові значення, за короткий проміжок часу. За такої схеми руйнування попереднє виявлення аварійної ситуації є проблематичним і не завжди можливим. При дії ж поступового розвитку дефектів проводиться регулярне діагностування з метою попередження руйнування об'єкту.

Час оновлення і періодичність накопичення інформації в системах діагностики визначається не лише часом розвитку дефекту, але і режимом роботи об'єкту, що діагностується. Для резервуарів з ЕНР, наприклад, з пальним, можна виділити як мінімум три режими роботи системи, обумовлені режимами експлуатації резервуару: режим накачки палива; стаціонарний режим; режим відкачки палива.

Аналіз вібраційних характеристик при накачці, відкачці палива та дії підвищених вітрових навантажень значно збільшує достовірність діагностування багатьох дефектів. Але контроль вібрації на цих режимах вимагає реалізації методів високошвидкісного багатоканального вимірювання.

При фіксації системою можливості виникнення аварійної ситуації вмикається передаварійний режим роботи, який дозволяє здійснювати більш ретельний та глибший моніторинг об'єкту діагностики.

Опираючись на наведені вище дані, нормативні документи та статистичний аналіз виникнення аварійних ситуацій на схожих об'єктах в [55] запропоновано три основних режими організації роботи системи діагностики та прогнозування технічного стану резервуару з пальним: стаціонарний режим, динамічний режим (при накачці, відкачці палива та дії підвищених вітрових навантажень), та передаварійний режим.

При стаціонарному режимі доцільно проводити діагностування (опитування датчиків) протягом 10 хвилин з періодом 6 годин, що дає змогу оптимізувати обсяги інформації, які аналізуються системою не зменшуючи надійності контролю. Діагностична інформація надходить від тензодатчиків та акселерометрів з найвищою частотою опитування - протягом 15 секунд через кожні 30 секунд. Діагностична інформація від інклінометрів надходить з меншою частотою опитування - кожні 5 хвилин (починаючи з першого зняття даних при початку діагностування).

При роботі в динамічному режимі діагностичні данні знімаються у режимі реального часу, що дає можливість оцінити реакцію об'єкта на динамічні навантаження, що виникають при накачці, відкачці палива та дії підвищених вітрових навантажень.

Робота системи в перед аварійному режимі включає в себе принципи роботи двох попередніх режимів, а саме: датчики, що зафіксували перевищення граничних значень працюють в динамічному режимі, всі інші в стаціонарному. Це дозволяє, в свою чергу, значно зменшити обсяг діагностичних даних, що полегшує процес їх аналізу, сприяє концентрації уваги спеціалістів-діагностів на аварійно-небезпечній ситуації, що виникла.

Головним завданням моніторингу є попередження руйнування елементів конструкцій резервуарів та аварійних ситуацій при їх експлуатації. Тому керування процесом діагностики здійснюється так, що при реєстрації системою виникнення дефектів на ранніх стадіях розвитку (що є дуже принциповим), система попереджає про виникнення потенційно небезпечної ситуації за допомогою звукових та зорових сигналів. Виникнення дефектів реєструється за допомогою заданих граничних значень сигналів, що надходять від датчиків (рис. 4.1).

4.4. Обробка діагностичної інформації

Особливості та труднощі процесу визначення інформативних діагностичних ознак, що є чутливими до зародження і початкового розвитку дефекту та інваріантними до завад, визначають вимоги до вибору методів обробки діагностичної інформації. Важливими факторами при цьому є порівняно малі змінювання корисних сигналів (чи їх складових) за наявності вимірювальних шумів. Найчастіше при визначенні ТС об'єкта за характеристиками вібрації обробці підлягають сигнали, що відповідають локально-нестационарній моделі, причому наявність в сигналі локальної нестационарності за звичай пов'язано з порушенням суцільності матеріалу конструкції, з локальним змінюванням його властивостей у часі або просторі, а також має місце при нестационарному чи локально-нестационарному вібраційному збудженні.

Для визначення грубих дефектів найчастіше обмежуються аналізом узагальнених енергетичних характеристик сигналів (спектрально-кореляційних), але для вирішення задачі виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку необхідно використовувати більш чутливі методи обробки інфо-

рмації. Для обробки діагностичної інформації про вібраційний та напружено-деформований стан, про просторове положення резервуару під впливом динамічних та статичних навантажень в [34] обґрунтовано застосування таких методів аналізу: спектральний та частотно-часовий аналіз інформації вібраційних датчиків для поточного моніторингу вібраційного стану конструкції резервуару; методи Проні та Штейгліца-Макбрайда для оцінювання параметрів сигналів вібраційних датчиків з метою визначення поточного функціонального стану резервуару; методи статистичного та фрактального аналізу (фрактальні розмірності, показник Хьорста). Наведемо коротку характеристику деяких з цих методів.

- **Методи Проні та Штейгліца-Макбрайда [58]**

Одним з проявів виникнення дефектів в елементах конструкцій об'єктів є змінювання коефіцієнтів згасання вільних коливань, чи локальних частин вібраційних сигналів, які описуються моделлю згасаючих багаточастотних. Для оцінки коефіцієнтів згасання α_i чи відносних показників $\varsigma_i = \alpha_i / 2\pi f_i$ використовується метод Проні [59], який полягає в апроксимації вибірки, що містить N точок множини даних, q -членною моделлю комплексних експонент:

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^q A_k \exp[(\alpha_k + j2\pi f_k)(n-1)T + j\theta_k], \quad (4.1)$$

де T – період дискретизації; n – номер такту; A_k , α_k , f_k , θ_k – відповідно амплітуда, коефіцієнт згасання, частота та початкова фаза k -тої складової.

З урахуванням позначень $h_k = A_k \exp(j\theta_k)$ та $z_k = \exp[(\alpha_k + j2\pi f_k)T]$ вираз (4/1) можна записати у вигляді:

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^q h_k z_k^{n-1},$$

або у формі z – перетворення:

$$\hat{x}[z] = \sum_{k=1}^q \frac{h_k z}{z_k (z - z_k)}, \quad (4.2)$$

де $z = \exp(j2\pi fT)$.

Оцінка невідомих параметрів A_k , α_k , f_k , θ_k за методом Проні визначається за оцінками коефіцієнтів дискретної передаточної функції деякого фільтра з кінцевою імпульсною характеристикою. В якості імпульсної характеристики фільтра використовується N – точкова вибірка з множини оброблюваних

даних, причому, дискретна передаточна функція фільтра тотожно дорівнює перетворенню (4.2), яке записано через шукані параметри h_k і z_k . Таким чином, після визначення параметрів передаточної функції фільтра знаходимо її полюси z_i , за якими визначаються оцінки частоти f_i та коефіцієнта згасання α_i i -тої коливальної складової сигналу відповідно до виразів:

$$\hat{\alpha}_i = \ln|z_i|/T \quad \text{та} \quad \hat{f}_i = \arctg[\text{Im}(z_i)/\text{Re}(z_i)]/2\pi t.$$

Метод Штейнліца-МакБрайда, як і метод Проні дозволяє синтезувати фільтр за заданою імпульсною характеристикою, яка не прагне забезпечити точний збіг початкових фрагментів імпульсних характеристик – замість цього метод мінімізує квадратичне відхилення отриманої характеристики від заданої, тобто суму квадратів модулів різниці відліків отриманої і бажаної імпульсних характеристик [60].

Відповідно до зазначеного, функція мінімізує суму квадратів модулів різниць між заданою імпульсною характеристикою $h(k)$ і імпульсною характеристикою $h^b(k)$ рекурсивного фільтра із заданими порядками поліномів чисельника і знаменника функції передачі:

$$\sum_{k=0}^N |h(k) - h^b(k)|^2 \rightarrow \min, \quad (4.3)$$

де N – порядок заданої імпульсної характеристики.

В z -області вираз, що стоїть під знаком модуля має вигляд

$$H(z) - H^b(z) = H(z) - \frac{B(z)}{A(z)}, \quad (4.4)$$

де $B(z)$ і $A(z)$ – поліноми відповідно чисельника і знаменника функції передачі синтезованого фільтра.

Пошук коефіцієнтів цих поліномів відбувається за допомогою ітераційного методу Штейнліца-МакБрайда, відповідно до якого вираз (4.4) записується у формі

$$H(z) - H^b(z) = \frac{H(z)}{A(z)} A(z) - \frac{1}{A(z)} B(z),$$

і в знаменниках дробів використовується оцінка поліному $A(z)$, отримана на попередній ітерації. Отриманий вираз відповідає нерекурсивному фільтру, так що для знаходження коефіцієнтів поліномів $B(z)$ і $A(z)$, що мінімізують (4.3), необхідно розв'язати систему лінійних рівнянь.

У процесі розв'язання завжди виконується задане число ітерацій, будь-якої перевірки збіжності процесу не проводиться. Як видно з (4.3), при підсумовуванні враховується кінцеве число доданків, що дорівнює довжині цільової імпульсної характеристики. Тому при апроксимації характеристики кінцевої довжини її слід доповнити деякою кількістю нулів для зменшення амплітуди згасаючого «хвоста».

- **Фрактальний аналіз [61,62]**

Вібраційні процеси, що протікають в об'єктах в умовах тривалого динамічного збурення, характеризуються шумоподібними часовими реалізаціями, багатокомпонентними складом, часто – хаотичністю. В таких випадках складно виявити корисну складову сигналу, спрогнозувати зміни чи класифікувати його. Фрактальний аналіз є одним із перспективних напрямків для дослідження таких часових послідовностей. Це обумовлено його здатністю аналізувати сигнали, які з точки зору кореляційної або спектральної теорії являються не більше, ніж просто білим шумом чи броунівським рухом.

Фракталом називається структура, що складається з частин, які в якомусь сенсі подібні цілому. Є різні сімейства геометричних чи конструктивних фракталів, які мають властивості самоподібності та масштабної інваріантності і можуть досить компактно описувати різноманітні об'єкти і процеси [61]. В [63] фрактали розглядаються як множина точок, які вкладені у простір. Параметр, що характеризує міру заповнення фрактальною множиною деякого простору (простору вкладення), називається фрактальною розмірністю. Наближено фрактальну розмірність можна вважати характеристикою геометричної складності просторового об'єкта. В залежності від об'єкта дослідження та методу розрахунку в [61] наведено аналіз різних видів фрактальної розмірності, які застосовуються для визначення та характеристики фрактальної структури часових послідовностей і зображень.

Для часових послідовностей основним методом визначення фрактальної структури є R/S - аналіз, або метод нормованого розмаху, розроблений англійським гідрологом Гарольдом Е. Херстом. Розрахунок показника Херста H проводиться за таким алгоритмом [62]:

1. Часову послідовність довжиною L необхідно поділити на d діапазонів $z_{i,m}$ довжини n , для кожного діапазону $i = 1, \dots, n$; $m = 1, \dots, d$.
2. Для кожного діапазону $z_{i,m}$ необхідно визначити середнє значення E_m та стандартне відхилення S_m .
3. Дані з діапазонів $z_{i,m}$ потрібно центрувати шляхом віднімання серед-

нього значення вибірки $X_{i,m} = Z_{i,m} - E_m$ для $i = 1, \dots, n$.

4. За отриманими даними створити кумулятивний часовий ряд

$$Y_{i,m} = \sum_{j=1}^i X_{j,m}.$$

5. Розрахувати розмах в межах кожного діапазону

$$R_m = \max\{Y_{1,m}, \dots, Y_{n,m}\} - \min\{Y_{1,m}, \dots, Y_{n,m}\}$$

6. Нормувати розмах R_m / S_m .

7. Розрахувати середнє значення нормованого розмаху $(R/S)_n$ всіх діапазонів довжини n .

Отримані дані подаються у вигляді графіка в подвійних логарифмічних масштабах залежності функції $\log(R/S)$ від $\log(n)$. Тангенс кута нахилу лінійної апроксимації отриманого графіка є показником Херста H .

Показник Херста H трактується як відношення «сили» тренду до рівня шуму, при цьому сила тренду оцінюється в залежності від того, на скільки величина H перевищує значення 0,5.

В [62] розглядаються такі інтервали значень показника Херста:

- $H=0$ – характеризує сигнал, як ідеальний переміжний або періодичний процес, в загальному випадку не дуже складна повторювана конфігурація;
- $0 < H < 0,5$ – характеризує антиперсистентність процесу, коли будь-яка тенденція прагне змінитись на протилежну, ймовірність зміни тим вища, чим менше значення H , кореляція від'ємна;
- $H=0,5$ – характеризує сигнал, як білий шум, гаусівську послідовність незалежних нормально розподілених величин;
- $0,5 < H < 1$ – характеризує персистентність (стійкість тенденції, наявність довготривалих кореляцій), тенденція може бути прогнозована;
- $H=1$ – характеризує ідеальну стійкість тенденції, лінійні залежності;
- $H > 1$ – характерне для степеневого закону розподілу часового ряду (розподілу з «важкими» хвостами), сильних трендів.

З показником Херста пов'язані дві варіації фрактальної розмірності. Фрактальна розмірність D (або розмірність Хаусдорфа-Безиковича) дає оцінку ступеня зламаності ряду і визначається за співвідношенням $D=2-H$, де H - показник Херста. Параметри H і D є мірою стійкості статистичного явища чи мірою тривалості довгострокової залежності стохастичного процесу. Фрактальна розмірність Мандельброта A є оберненою величиною до показника

Херста ($A=1/H$) і є розмірністю простору ймовірностей, за якою оцінюється товщина хвостів у функції щільності ймовірності.

Застосування фрактального аналізу дозволяє отримати прості кількісні характеристики складних шумоподібних сигналів, які можна використовувати в діагностичних цілях.

4.5. Візуалізація даних в системі моніторингу

Для створення ефективного алгоритмічного та програмного забезпечення для системи моніторингу та діагностики необхідне розуміння фізичної сутності процесів, які протікають в об'єкті та призводять до появи діагностичних сигналів. Тому за результатами інструментальних досліджень об'єкта будується його діагностична модель, яка встановлює зв'язок між простором його станів і простором характеристик різноманітних діагностичних сигналів [3]. Остаточний вибір діагностичних параметрів проводиться після того, як встановлено їх взаємозв'язок з контрольованими технічними характеристиками об'єкта (наприклад, за допомогою імітаційного моделювання), що знаходиться в тому чи іншому стані. Коли усі діагностичні параметри, які є вихідними даними первинних перетворювачів та вхідними даними підсистеми візуалізації (рис. 4.1), обрані та виміряні, вони передаються до відповідних блоків обробки вібраційних, тензометричних та інклінометричних даних (БОВД та БОТІД).

Підсистема візуалізації поточного та прогнозного стану об'єкта має виконувати наступну сукупність операцій [2,3]:

- перетворення вихідних даних та їх введення в імітаційну модель;
- візуальне уявлення елементів модельованого об'єкта і управління моделлю (параметричне геометричне моделювання);
- імітація взаємодії елементів конструкції (імітаційне моделювання);
- візуальне відображення результатів моделювання.

Ілюстрація функціональних можливостей підсистеми візуалізації в системі структурного моніторингу резервуарів на рис. 4.2 показує, що основним призначенням елементів підсистеми візуалізації буде [2,3]:

1) Для модуля керування з інтерфейсом користувача:

- отримання вихідних даних з інших підсистем системи моніторингу або безпосередньо з датчиків;

- перетворення отриманих даних та їх введення в імітаційну модель;
- забезпечення взаємодії елементів підсистеми візуалізації та керування процесом моделювання (геометричного та імітаційного);
- відображення результатів (візуалізація).

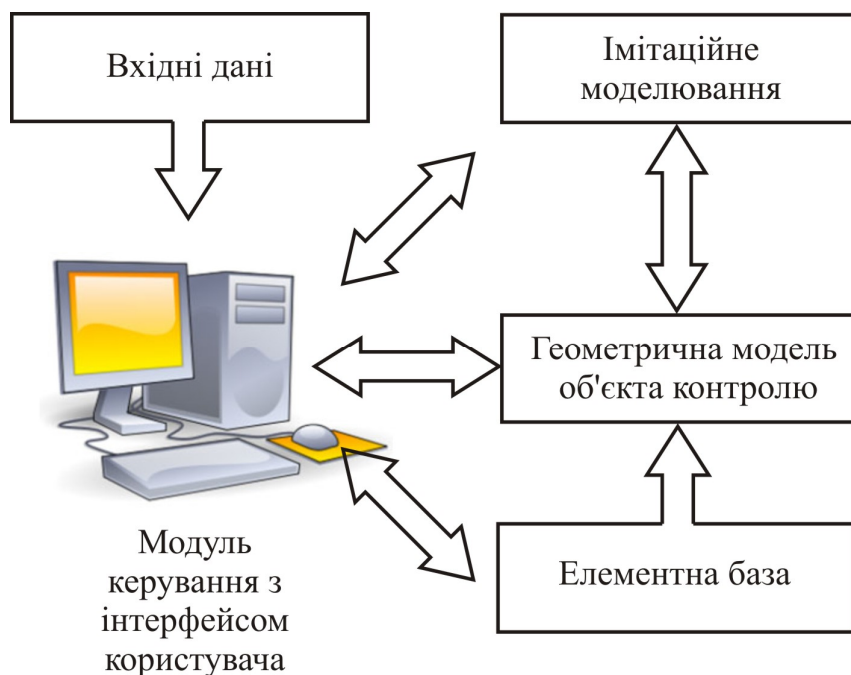


Рис. 4.2. Ілюстрація функціональних можливостей підсистеми візуалізації

2) Для моделі резервуару:

- реалізація модельного подання досліджуваного резервуару (геометричне моделювання з необхідною точністю);
- візуальне подання результатів моделювання у вигляді, зручному для сприйняття і подальшого аналізу.

3) Для елементної бази:

- зберігання геометричних моделей основних елементів конструкції (клапани, патрубки, люки, тощо) для зміни основної моделі при різних видах аналізу.

4) Для імітаційного моделювання:

- проведення необхідних обчислювальних процесів по перетворенню даних вимірювань з первинних перетворювачів;
- передача даних на модель резервуару для візуалізації;

- розрахунок та використання статистичних даних по кожному з діагностичних параметрів для здійснення та візуалізації прогнозу зміни ТС резервуару через певний проміжок часу.

Реалізувати таку підсистему можливо за принципом, який використовують системи реєстрації та візуалізації руху (також їх часто називають системами захоплення руху) [2,3]. Вони з'явилися наприкінці 80-х - початку 90-х років минулого століття і застосовувалися, в основному, при створенні анімації у фільмах. Вдосконалення технологій захоплення руху і тривимірної графіки, а також програмного забезпечення привело до появи ідеї про впровадження цього принципу в діагностичну апаратуру.

У наш час існує безліч спеціальних графічних пакетів для створення 3D-анімації за допомогою спеціальних функцій, але найбільш природна передача переміщень елементів конструкції виходить саме при використанні систем захоплення руху. Для обробки (перетворення) даних, отриманих в результаті вимірювань на об'єкті, можна використовувати і графічні пакети, але для впровадження у діагностичну апаратуру необхідно розробити алгоритмічне та програмне забезпечення, що є спеціально адаптованим під візуалізацію даних комплексних вимірів (наприклад, напружень та кутових переміщень об'єкта).

Сучасні програмні та апаратні засоби пропонують широкий спектр можливостей вирішення задач моделювання. Головною проблемою при побудові будь-якої системи візуалізації на основі імітаційного моделювання для систем моніторингу та діагностики є необхідність розробки спеціалізованого програмного забезпечення. У сучасних засобах імітаційного моделювання ця проблема вирішується за допомогою автоматизації побудови коду на основі графічних систем (геометричних моделей) і з використанням методів об'єктно-орієнтованого програмування [2,3]. Даний підхід значно полегшує процес створення адекватних імітаційних моделей для використання в системах функціональної діагностики і робить їх більш зрозумілими для людини-оператора. Саме тому система функціональної діагностики, побудована на основі імітаційного моделювання, може поєднувати у собі різні алгоритми моделювання (математичне, геометричне і т.д.) і проводити операції безпосередньо з інформативними властивостями моделі об'єкта.

Для розкриття особливостей функціонування, опису істотних параметрів підсистеми візуалізації, а також зв'язків між ними в [2] було розроблено і в [3] використано її інформаційну модель (рис. 4.3). Модель передбачає на-

явність зовнішніх (вхідних) даних, які, відповідно до розробленої функціональної схеми системи моніторингу (рис. 4.1), є сигналами з трьох типів первинних перетворювачів: акселерометра (ВК), тензорезистора (ТК) та інклінометра (ІК).

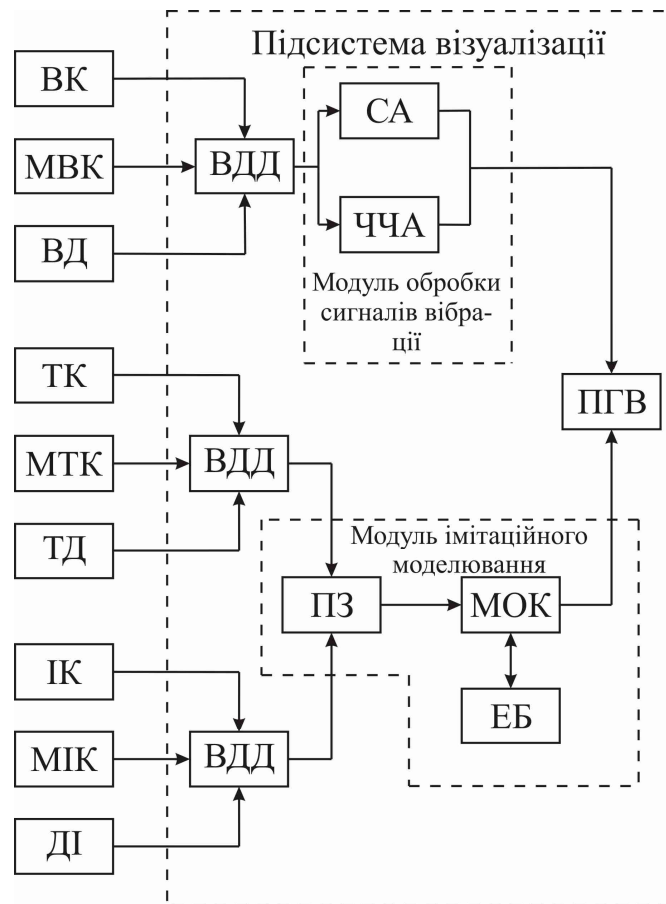


Рис. 4.3. Інформаційна модель підсистеми візуалізації:

ВК – вібраційний канал; МВК – модель вібраційного каналу; ВД – вібраційні дані; ТК – тензометричний канал; МТК – модель тензометричного каналу; ТД – тензометричні дані; ІК – інклінометричний канал; МІК – модель інклінометричного каналу; ДІ – дані інклінометрії; ВДД – вибір джерела даних; СА – спектральний аналіз; ЧЧА – частотно-часовий аналіз; ПЗ – спеціалізоване програмне забезпечення; МОК – модель об’єкта контролю; ЕБ – елементна база; ПГВ – пристрій графічного відображення

Окрім використання датчиків, як джерела інформації, необхідної для функціонування підсистеми візуалізації, можуть також використовуватися математичні моделі каналів вібрації, тензометрії та інклінометрії (МВК,

МТК, МІК відповідно) або файли з вібраційними (ВД), тензометричними (ТД) та інклінометричними (ІД) даними, отриманими, наприклад, за допомогою інших діагностичних систем на даному об'єкті або для візуалізації окремого найбільш інформативного набору вимірюваних даних.

Обробка вхідних даних розділена на два окремих модуля. Модуль обробки сигналів вібрації включає в себе спектральний (СА) та частотно-часовий (ЧЧА) аналіз вхідних сигналів вібрації. Модуль імітаційного моделювання призначений для перетворення вхідних тензометричних та інклінометричних даних спеціалізованим програмним забезпеченням (ПЗ) у відповідні візуальні зміни моделі об'єкта (МОК). Для забезпечення повноти аналізу модель може доповнюватися або спрощуватися за допомогою моделей елементів конструкції що містяться у елементній базі (ЕБ).

Пристрій графічного відображення (ПГВ) призначений для візуалізації результатів перетворень вхідних даних у інтуїтивно зрозумілий для людини-оператора вигляд.

На основі інформаційної моделі з описом основних принципів, які мають бути реалізовані в підсистемі візуалізації для її інтеграції в систему моніторингу, розробляється основний алгоритм, тобто набір інструкцій, що описують порядок необхідних для досягнення результату дій [2,3]. У загальному випадку алгоритм розробляється таким чином, щоб програмне забезпечення на його основі можна було написати будь-якою мовою програмування.

Головним призначенням програми візуалізації вібраційних даних є обробка (перетворення) записаних у файл вихідних даних для побудови графіків амплітудно-частотних та частотно-часових залежностей з урахуванням особливостей запису даних у файл, параметрів АЦП (розрядність, вхідний діапазон), кількості вимірювальних каналів, тощо [2,3].

Головним призначенням програми візуалізації комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів є обробка (перетворення) записаних у файл вихідних даних для коректного їх відображення на імітаційній моделі ОК з урахуванням особливостей запису даних у файл, параметрів АЦП (розрядність, вхідний діапазон), кількості первинних перетворювачів, яка впливає на кількість елементів тривимірної моделі для відображення даних, тощо [2,3].

За визначеним набором інструкцій, необхідних для візуалізації даних вимірювань вібрації, кутового положення та напружень, розробляється від-

повідне програмне забезпечення для використання в підсистемі візуалізації системи моніторингу.

Для створення основної частини програмного забезпечення для візуалізації тензометричних та інклінометричних вимірювань було використано мову програмування Processing – це діалект мови програмування під назвою Java [3]; він має майже той же синтаксис, але доповнений спеціальними командами для роботи з графікою і зовнішніми пристроями. Processing містить в собі особливості багатьох мов програмування і тому може послужити хорошим введенням в програмування на інших мовах з використанням інших інструментів розробки.

Як і будь-яке програмне забезпечення Processing складається з великої кількості компонентів, які працюють разом. Він може бути використаний як для простих виробів, так і для докладного дослідження. Програма на Processing може становити від одного до декількох тисяч рядків коду, тому завжди можна поліпшити і розширити її функціонал. Існує більше 100 бібліотек розширення, що дозволяють застосовувати Processing для обробки звуку, досліджень в області машинного зору і технічних розрахунків. Графічні об'єкти Processing споріднені системі PostScript, що послужила основою для формату PDF і OpenGL (графічна бібліотека для написання додатків, що використовують 3D-графіку).

5. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДСИСТЕМ І БЛОКІВ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

5.1. Реалізація підсистеми візуалізації даних комплексних вимірювань напружень та кутового положення резервуару

Підсистему візуалізації в системі структурного моніторингу було реалізовано на основі імітаційного моделювання. Використання можливостей імітаційного моделювання та принципів, покладених в основу систем захоплення рухів, обумовлено тим, що стандартні методи візуалізації діагностичної інформації, наприклад, гістограми та графіки, не завжди дозволяють швидко та ефективно локалізувати місця виникнення надмірних деформацій, тріщин або інших дефектів, що виникають в досліджуваних об'єктах.

5.1.1. Написання основного коду програми

Програмне забезпечення для підсистеми візуалізації було створено в середовищі розробки Processing [2,3]. В текстовому редакторі середовища програмування записується код програми. Кожна програма починається з імпорту необхідних бібліотек розширення. Для цього необхідно попередньо завантажити та інсталиувати кожен бібліотеку. Для програми візуального відображення (візуалізації) результатів комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів достатньо використати лише бібліотеку роботи з тривимірними геометричними моделями «OBJLoader».

Тіло програми, написаної мовою Processing відповідно до алгоритму [2,3], складається з двох основних функцій – «setup()» та «draw()». Код, записаний у блоці «draw()», виконується зверху вниз, а потім повторюється до тих пір, доки оператор не завершить програму, натиснувши кнопку «Stop» або зачинивши вікно. Кожне виконання коду в функції «draw()» називається кадр і за замовчуванням частота дорівнює шістдесяти кадрам в секунду.

Тому необхідно створити новий клас (комбінацію полів (даних) і методів (функцій, які є частинами класу), які можуть бути використані в якості об'єктів) для затримки відображення кожного дискретного значення виміря-

ної величини. Створення класу розпочинається з ключового слова «class», а також його назви, наприклад, «class Timer», після чого в дужках {} записується принцип функціонування даного класу, оголошуються функції або процедури, що відносяться до даного класу та наводяться їх алгоритми.

Наступним кроком є оголошення глобальних змінних, серед яких будуть використовуватися певні типи даних, а саме: таймери («Timer» з розробленого класу), таблиці («Table»), цілі («int») та дійсні («float») числа, boolean (повертає тільки значення «true» та «false»), а також тривимірні геометричні об'єкти («OBJModel» з використаної бібліотеки розширення).

Як доповнення до функції «draw()» існує функція «setup()», яка виконується одноразово при запуску програми. Код всередині функції «setup()» використовується для оголошення початкових значень глобальних змінних, у тому числі тривимірних геометричних моделей, таймерів, таблиць, тощо.

Першим рядком функції «setup()» має бути функція «size()», яка задає розміри вікна програми в пікселях. Якщо функція «size()» не задана, то відкривається вікно зі стандартними розмірами 100x100 пікселів.

Для програми візуалізації необхідно задати наступні параметри вікна: size(700, 700, OPENGLE). Перших два параметра – це відповідно ширина та висота, а третій параметр «OPENGLE» вказує на те, який рендерер використовується для роботи з графікою. Рендерер – це комп'ютерна програма, що створює цифрове растрове зображення по тривимірній віртуальній моделі об'єкта з урахуванням властивостей приписаного об'єкту матеріалу, текстур і джерел світла. На даний момент в Processing представлені три рендерера: P2D (Processing 2D) для роботи з двовимірною графікою, P3D (Processing 3D) та OpenGL для роботи з тривимірною графікою [2].

Після того як робоча область розміром 700x700 пікселів задана, можна призначати початкові значення усіх глобальних змінних, наприклад, змінна з цілочисельним типом даних «X=0;», тощо.

Реалізувати обертання тривимірної моделі маніпулятором у програмному середовищі Processing можна, наприклад, за допомогою відслідковування положення мишки, використовуючи функцію «mouseDragged()» поза блоками «setup()» та «draw()». Ця функція починає виконуватися при натисканні будь-якої кнопки мишки та її одночасному переміщенні. Програмний код виглядає наступним чином [2]:

```
void mouseDragged() {  
    rotX += (mouseX - pmouseX) * 0.015;
```

*rotY -= (mouseY - pmouseY) * 0.015;}*

Тут «rotX» та «rotY» – глобальні змінні типу даних «float», які містять значення величини обертання моделі; mouseX та mouseY – змінні, які містять в собі поточну горизонтальну та вертикальну координату, відповідно; pmouseX та pmouseY – змінні, які містять в собі попередню горизонтальну та вертикальну координату, відповідно.

Реалізація виконання будь-яких дій при натисканні клавіші на клавіатурі здійснюється за допомогою функції «keyPressed()». Оскільки програмне забезпечення, відповідно до призначення підсистеми візуалізації, передбачає наявність тензометричних даних та даних про кутове положення об'єкта, необхідно реалізувати два незалежних типи візуалізації, тобто необхідно задати дві клавіші, наприклад, «t» для тензометричних та «r» для інклінометричних вимірювань [2].

Завдяки особливостям використаної бібліотеки розширення, імпортована геометрична модель має властивості матеріалу конструкції. Якщо вони увімкнені «modelMaterial = true;», то відображається колір матеріалу, якщо ні «modelMaterial = false;» – колір із палітри RGB (Red – червоний, Green – зелений, Blue – синій), заданий функцією «fill()», яка заповнює ним всю поверхню певного елемента.

Отже, при натисканні клавіші «t» першочергово відбувається перевірка матеріалу конструкції, а саме: якщо він був увімкнений, вимикається і навпаки. У першому випадку додатково у відповідну змінну у циклі записуються дані по першому каналу з файлу, а також запускається таймер затримки відображення цих даних на геометричній моделі. При необхідності дану частину програмного коду можна розширити на необхідну кількість елементів конструкції і відповідних результатів вимірювань по кожному каналу даних.

За допомогою функції «keyPressed()» також можна реалізувати відображення кутового положення об'єкта після натискання клавіші «r», що запускає таймер затримки відображення відхилення геометричної моделі по трьом осям від їх попередніх положень [2]. Значення кутів повороту по осям «X», «Y», «Z» записуються з файлу даних у відповідні змінні у циклі. Як для тензометричних, так і для інклінометричних вимірювань візуалізація відбувається при кожному виконанні циклу до тих пір, поки у файлі з результатами вимірів присутні дані.

Програмування блоку «draw()» розпочинається з набору стандартних функцій, які встановлюють, наприклад, певний фон: «background(0)»,

«lights()», «translate(width/2, height/2, 0)», «rotateX(rotY)», «rotateY(rotX)». Ці функції відповідно виконують наступні дії: встановлення чорного фону, стандартне освітлення, переміщення геометричної моделі в центр вікна, зміна кутового положення тривимірної моделі маніпулятором за допомогою створеної раніше функції «mouseDragged()».

Далі, у залежності від натиснутої на клавіатурі клавіші, виконуються функції для візуалізації даних тензометричних та інклінометричних вимірювань [2].

Таким чином в [2,3], мовою Processing було розроблено програмне забезпечення для візуалізації даних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів. Наступним кроком для реалізації підсистеми візуалізації є створення геометричної моделі резервуару, як об'єкта моніторингу, та вдосконалення (розширення) програмного коду для підтримки більшої кількості елементів конструкції.

5.1.2. Створення геометричної моделі об'єкта

Відповідно до наведеної на рис. 4.3 інформаційної моделі, підсистема візуалізації містить модель об'єкта (МОК) та елементну базу (ЕБ) для її доповнення чи спрощення. Тому наступним кроком програмної реалізації підсистеми візуалізації є розробка геометричної моделі об'єкта, на якій будуть відображатись зміни його технічного стану за результатами проведених вимірювань. Прототипом для розробки геометричної моделі резервуару було обрано вертикальний сталевий резервуар циліндричної форми об'ємом $0,04 \text{ м}^3$. На рис. 5.1 наведено загальний вигляд резервуару та створена в графічному пакеті САПІА його спрощена тривимірна модель [2,3].

Спрощення моделі полягало у виключенні з розгляду деяких елементів конструкції (наприклад, ручок і затискачів кришки) для оптимізації співвідношення час розрахунку/точність результатів при імітаційному моделюванні. Геометричні моделі відомих концентраторів напружень можуть зберігатися в елементній базі (рис. 4.3) і вводиться в основну модель за необхідності.

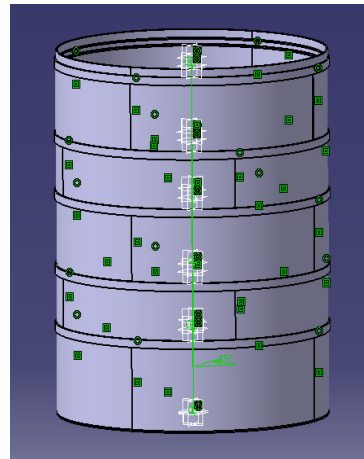
Розроблена модель резервуару складається з п'яти поясів та п'яти ребер жорсткості, які чергуються між собою [2,3]. Ребра жорсткості виконані у вигляді одного елементу конструкції, а кожен пояс розбито на чотири рівні частини (сегменти), на кожній з яких буде встановлюватися тензометричний вимірювач. Отже, всього двадцять елементів конструкції (п'ять поясів по чо-

тири елементи кожен) необхідно використовувати для візуалізації напружень на тривимірній моделі.

Загалом геометрична модель резервуару складається з двадцяти семи елементів з урахуванням ребер жорсткості, дна та шостого поясу (для закріплення кришки), які завжди залишаються у незмінному первозданному вигляді при візуалізації.



а)



б)

Рис.5.1. Вертикальний сталевий резервуар (а) та його геометрична модель (б)

Розроблену геометричну модель було імпортовано в професійну програмну систему для створення і редагування тривимірної графіки 3ds Max [2], головне вікно якої з імпортованою моделлю наведено на рис. 5.2.

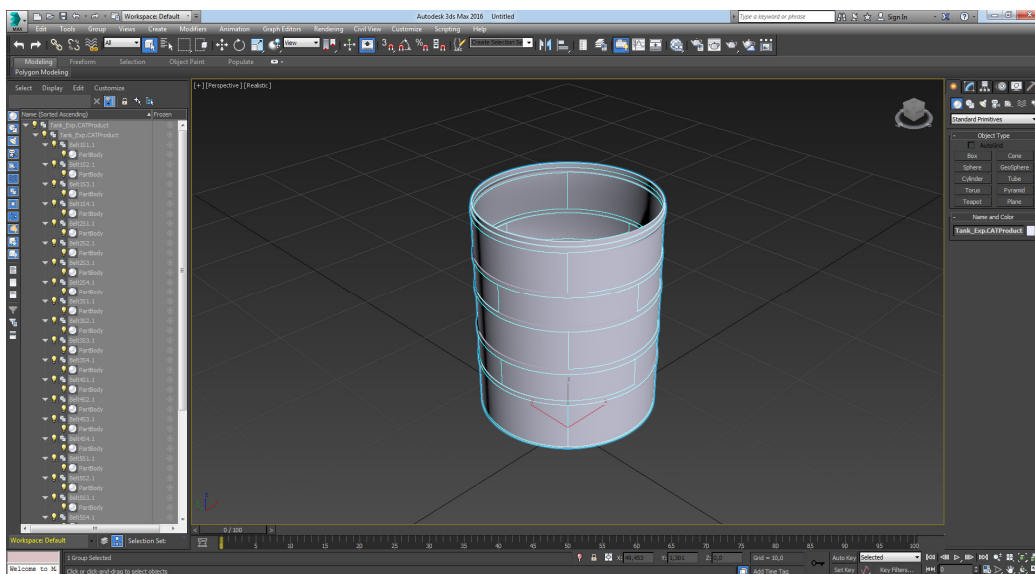


Рис. 5.2. Головне вікно програми 3ds Max з імпортованою моделлю

5.1.3. Перевірка працездатності програми візуалізації на основі імітаційного моделювання

Перевірку працездатності програми проведено відповідно до розробленої в [2] методики, яка, наприклад, для завдання візуалізації даних тензометричних вимірювань полягала в наступному:

1) У математичному пакеті MATLAB згенеровано тестові дані як випадкові цілі числа від 0 до 50 умовних одиниць. Під умовною одиницею розуміється абстрактна величина, яка відповідає певному фіксованому рівню напружень.

2) Шкалу оцінки результату розбито для прикладу на 5 рівних проміжків, що відповідають певному стану геометричної моделі, який визначає її колір:

- а) 0-10 умовних одиниць. Безпечна експлуатація конструкції, напруження не перевищують допустимих значень, немає необхідності додаткового контролю відповідного сегменту. Відображення синім кольором;
- б) 11-20 умовних одиниць. Безпечна експлуатація конструкції, підвищені напруження, які все ще знаходяться у допустимих межах, немає необхідності додаткового контролю відповідного сегменту. Відображення зеленим кольором;
- в) 21-30 умовних одиниць. Підвищена небезпека експлуатації, напруження в незначній мірі перевищують допустимі значення, можливість появи залишкової деформації, виникає необхідність проведення додаткових заходів по зменшенню рівня напружень у межах відповідних сегментів. Відображення жовтим кольором;
- г) 31-40 умовних одиниць. Небезпечна експлуатація конструкції, напруження в значній мірі перевищують допустимі значення, у межах відповідних областей виникає залишкова деформація, можливість швидкого розвитку та моментального розкриття тріщин, необхідність додаткового контролю інструментальними методами для локалізації зон концентрацій напружень в межах відповідних сегментів, проведення заходів щодо посилення конструкції та зменшення рівня напружень. Відображення помаранчевим кольором;
- д) 41-50 умовних одиниць. Аварійний стан, велика ймовірність моментального виходу з ладу відповідних сегментів через розкриття трі-

щин, руйнування зварних швів, тощо, необхідність повного виведення об'єкту з експлуатації та пошуку інструментальними методами зон концентрацій напружень в межах відповідних сегментів, проведення заходів щодо заміни окремих елементів, посилення конструкції та зменшення рівня напружень або повної утилізації об'єкта. Відображення червоним кольором.

3) При необхідності можна задати нові межі кожного проміжку (як і кількість проміжків) в залежності від розрахованих граничних значень вимірюваної величини.

4) Для перевірки відповідності згенерованих даних результатам візуалізації тензометричних вимірювань розглянуто два випадки тестових даних:

а) перевірка усіх проміжків однотипними даними (рис. 5.3,а), тобто вхідний файл з даними згенеровано таким чином, що в рамках кожного пояса ОК напруження в умовних одиницях не перевищують відповідних меж;

б) перевірка усіх проміжків випадковими даними (рис. 5.3,б), тобто у файлі містяться випадкові величини напружень від 0 до 50 умовних одиниць для кожного елементу конструкції.

5) Пункт (4) повторити декілька разів для різної комбінації згенерованих вхідних даних.

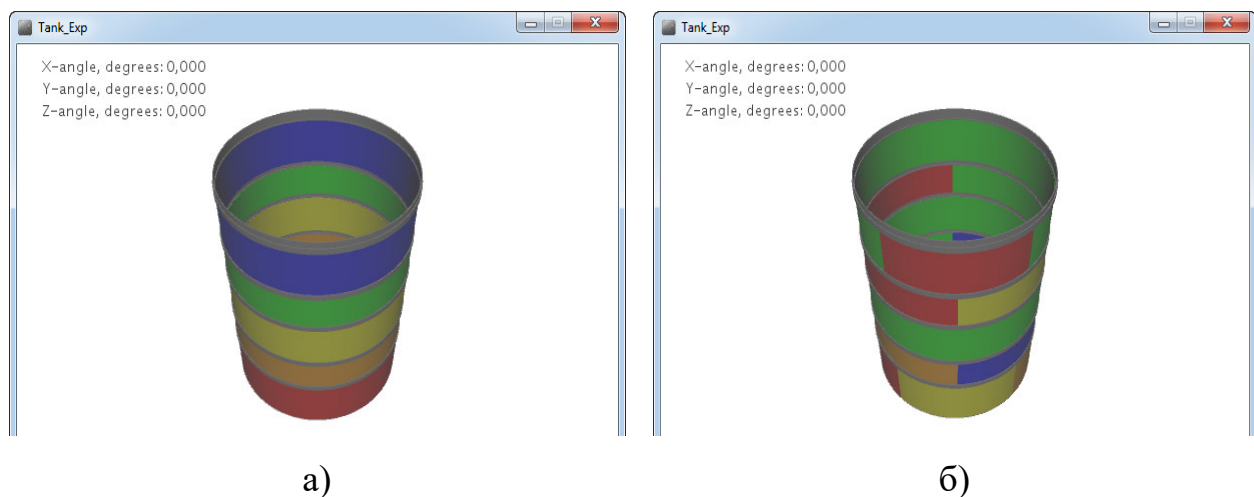


Рис.5.3. Результати візуалізації тензометричних даних для: а) перевірки однотипними даними; б) перевірки випадковими даними

Також у вікні програми додатково було додано відображення шкали кольорів та відповідного рівня напружень для кожного проміжку. У залежно-

сті від реальних даних (кількості вимірювальних перетворювачів, місць їх розташування, величини напружень, розрахованих граничних значень, тощо) програмний код можна змінити або розширити для більш точної відповідності поставленим задачам.

Перевірку працездатності програми візуалізації інклінометричних вимірювань проведено у відповідності до розробленої в [2] методики, яка полягає в наступному:

- 1) Перевірка кутового переміщення по кожній осі окремо (рис. 5.4,а), для чого вхідний файл з даними згенеровано таким чином, що в рамках однієї візуалізації він містить кути нахилу моделі об'єкту тільки по одній осі;
- 2) Перевірка кутового переміщення за трьома осями одночасно (рис. 5.4,б), для чого у файлі містяться випадкові величини кутів нахилу ОК по усім осям в рамках однієї візуалізації.
- 3) Пункти (1) та (2) повторити декілька разів для різної комбінації згенерованих вхідних даних.

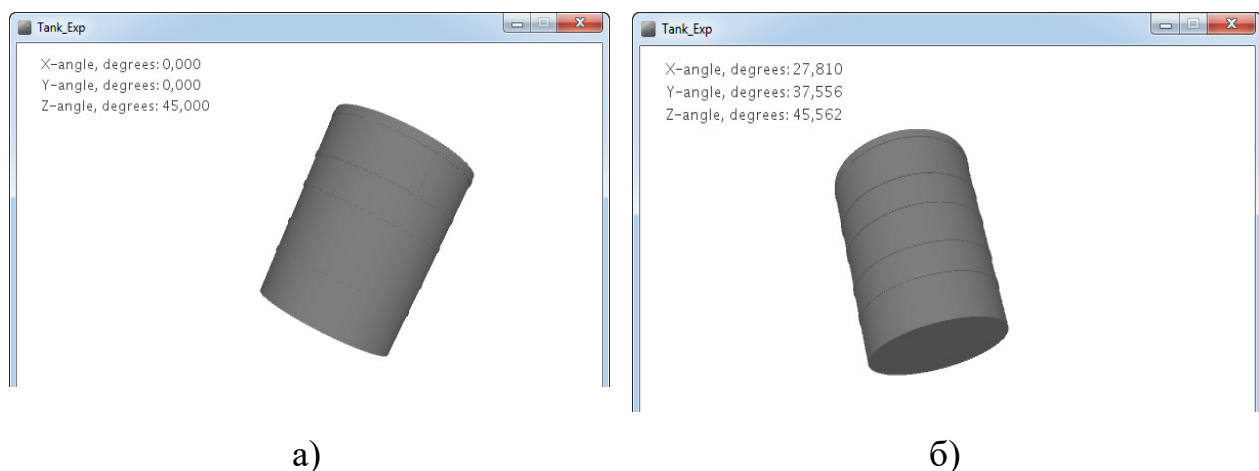


Рис. 5.4. Перевірка кутового переміщення геометричної моделі: а) по одній осі; б) по трьом осям одночасно

Остаточний вигляд головного вікна зображено на рис. 5.5 [2]. У результаті налагодження частини коду, що відповідає за візуалізацію кутового положення, у текст програми було додано код, що очищує змінні кутових переміщень по кожній осі при повторному натисканні клавіші «г» та після відображення останніх значень з файлу, які до цього залишалися в змінних і могли призвести до некоректної візуалізації.

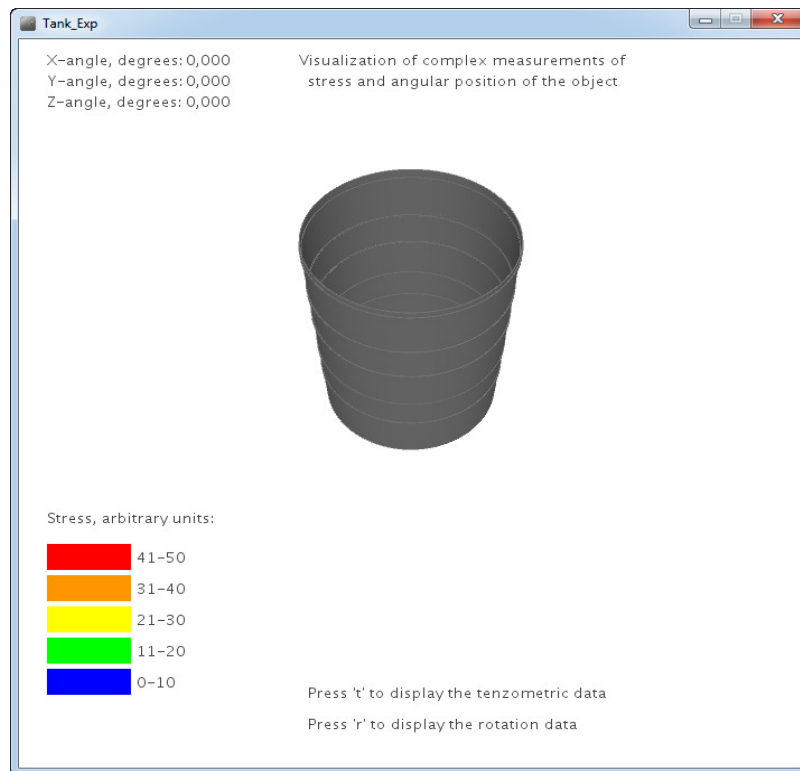


Рис. 5.5. Головне вікно програми

Розроблену програму візуалізації даних комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів доцільно використовувати (з необхідними розширеннями) для безперервної он-лайн візуалізації даних вимірювань безпосередньо з вимірювальних перетворювачів в системі структурного моніторингу резервуарів.

5.2. Візуалізація даних прогнозу рівня деформації елементів конструкцій резервуару

Розроблена підсистема візуалізації дозволяє використовувати інформацію, отриману з блоку прогнозу розробленої системи моніторингу, для прогнозування росту рівня деформації й виведення відповідних графіків у вигляді екстрапольованих ліній тренду - функціональної залежності вимірюваної величини від часу з практично відсутніми випадковими впливами [2,3,64]. При розробці моделей прогнозування тренд є основною складовою прогнозованого часового ряду, на яку вже накладаються інші, у тому числі випадкові, складові. Результат при цьому є виключно дискретною функцією часу. Модель тренду може виражатися за допомогою багатьох функцій, на основі яких формується модель прогнозу й відбувається її оцінка [65]. Для вирішення за-

вдання прогнозування результатів вимірювань у наш час широко використовуються математико-статистичні методи визначення моделі тренду на основі методу найменших квадратів, адаптивних методів, авторегресивних методів, тощо. Ці методи вимагають апріорної інформації про функцію тренда для коректного вибору ступеня полінома апроксимації. У тих випадках коли такої інформації немає, застосовуються евристичні прийоми, як, наприклад, метод ковзних середніх або метод експоненціального згладжування [66].

В [2,3] наведено найбільш поширені на практиці види моделей тренду:

1. Лінійна: $\hat{y}_k = a_0 + a_1 t_k$.
2. Параболічна:
 - другого порядку $\hat{y}_k = a_0 + a_1 t_k + a_2 t_k^2$;
 - третього порядку $\hat{y}_k = a_0 + a_1 t_k + a_2 t_k^2 + a_3 t_k^3$
 - функції більш високих порядків.
3. Степенева: $\hat{y}_k = a_0 + a_1 \cdot t_k^{a_2}$ або $\hat{y}_k = a_0 + a_1 \cdot t_k^{-a_2}$.
4. Показникова: $\hat{y}_k = a_0 \cdot a_1^{t_k}$ або $\hat{y}_k = a_0 \cdot e^{a_1 t_k}$.
5. Логарифмічна: $\hat{y}_k = a_0 + a_1 \cdot \lg t_k$.

Екстраполяція дискретної функції (моделі), якою описується тренд, дає змогу отримати точкове значення прогнозу зміни рівня деформацій на зазначений період часу. При цьому припускається, що зміна рівня напружено-деформованого стану конструкції, зокрема накопичення пластичних деформацій, формується під впливом декількох факторів, і такий вплив неможливо виділити окремо для кожного з факторів.

Побудова моделі тренду рівня деформацій відбувається за такою методикою [2,3]:

1. Проведення вимірювань рівня деформацій протягом заздалегідь визначеного проміжку часу, наприклад, 1 годину на добу.
2. Визначення математичного сподівання для виміряних даних.
3. Побудова точки на графіку, яка відповідає визначеному у пункті (2) математичному сподіванню.
4. Визначення моделі тренду.
5. Відображення прогнозних значень (екстраполяція тренду).

Побудова тренду на основі визначення математичного сподівання пояснюється його зміною при появі та накопиченні пластичних деформацій у

конструкції, які призводять до незворотних (у більшості випадків) змін геометрії об'єкта відносно його початкового стану.

Для візуалізації прогнозу зміни рівня деформацій у математичному пакеті MATLAB було реалізовано програму екстраполяції тренду на основі розробленого алгоритму, визначення моделі тренду відбувається за допомогою методу найменших квадратів з використанням параболічних моделей до третього порядку включно [66].

Екстраполяцію (прогнозування) зміни рівня деформацій на 31 значення в майбутнє проведено для такої математичної моделі результатів вимірювань [2,3,66]:

$$y_k = S_k + \varepsilon_k,$$

де S_k – корисний сигнал; ε_k – адитивна випадкова складова, що розподілена за гаусівським законом.

Моделі сигналів вимірювань обрані таким чином, що перших 40 вимірювань характеризують бездефектний стан конструкції, тобто всі деформації є пружними і $S_k = S_{k1} = const$. Усі наступні вимірювання містять пластичну деформацію, що зростає за лінійним законом

$$S_k = S_{k2} = S_{k1} + a \cdot t,$$

де a – константа; t – час.

Апроксимуючи результати двох вимірювань отримаємо лінійну залежність з достовірністю апроксимації $R^2 = 1$. На рис. 5.6 зображено прогнозну криву за результатами трьох вимірювань рівня деформацій. Як видно, апроксимація являє собою параболічну функцію другого порядку, а достовірність апроксимації складає $R^2 = 1$. Для 15 результатів вимірювань (рис. 5.7) точність апроксимації знижується $R^2 = 0,33$ за рахунок наявності у сигналі окрім корисної складової шуму, але майже в два рази збільшується точність прогнозу: з 1,7 мм до 0,998 мм.

Збільшенні кількості вимірювань до 31 (рис. 5.8) призводить до зменшення достовірності апроксимації за рахунок збільшення кількості випадкових складових. Поява вираженої закономірності у вимірюваннях (рис. 5.9), що зумовлена пластичною деформацією, призводить до значного підвищення достовірності апроксимації. Визначено, що для розглянутої моделі сигналів задовільна достовірність апроксимації параболоїдами другого і більш високих порядків досягається тільки при наявності вираженої закономірності у результатах вимірювань.

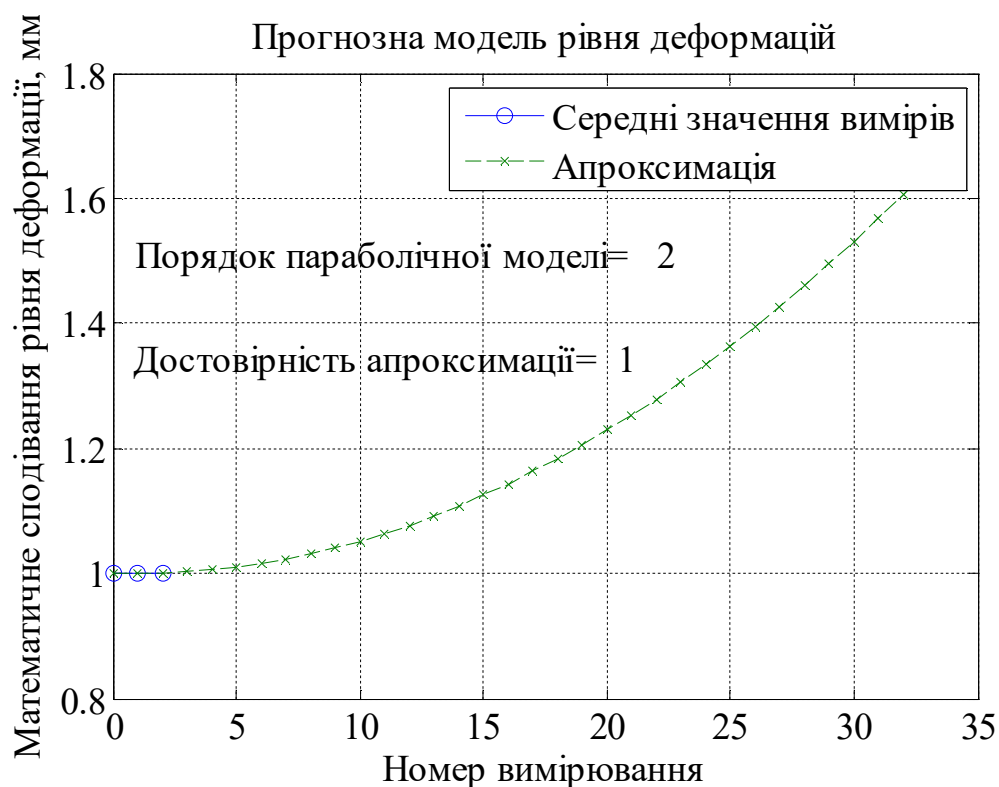


Рис. 5.6. Приклад екстраполяції тренду для результатів 3 вимірювань рівня деформацій

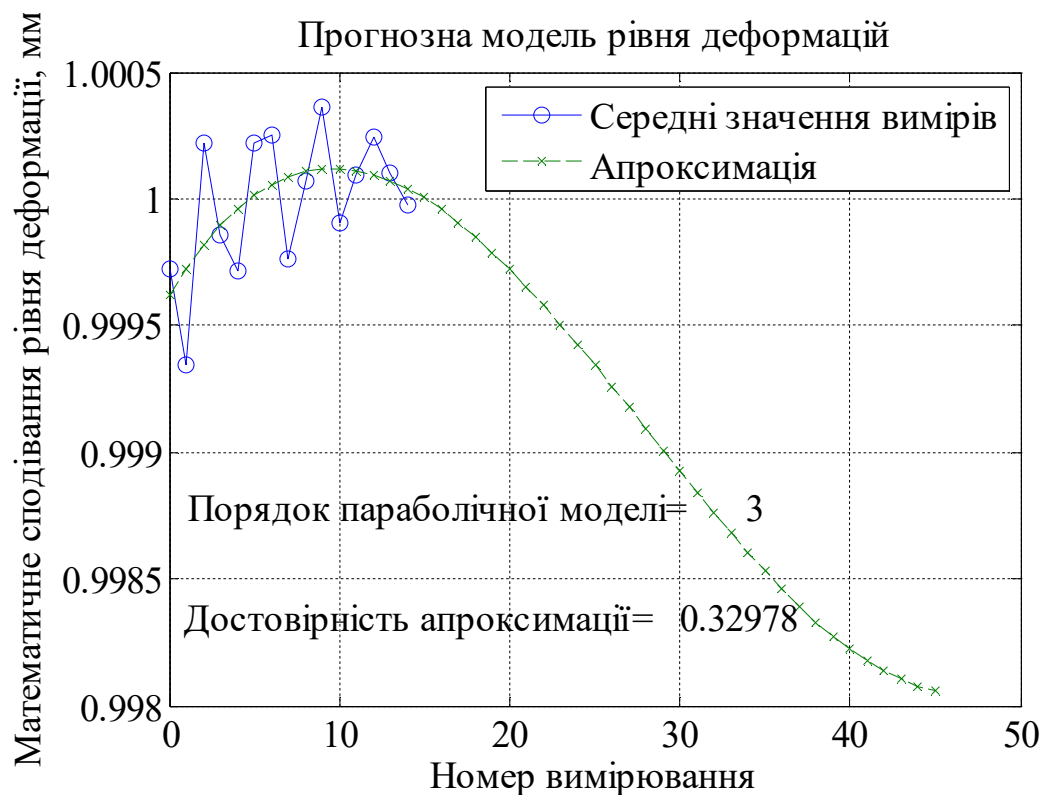


Рис. 5.7. Приклад екстраполяції тренду для результатів 15 вимірювань рівня деформацій

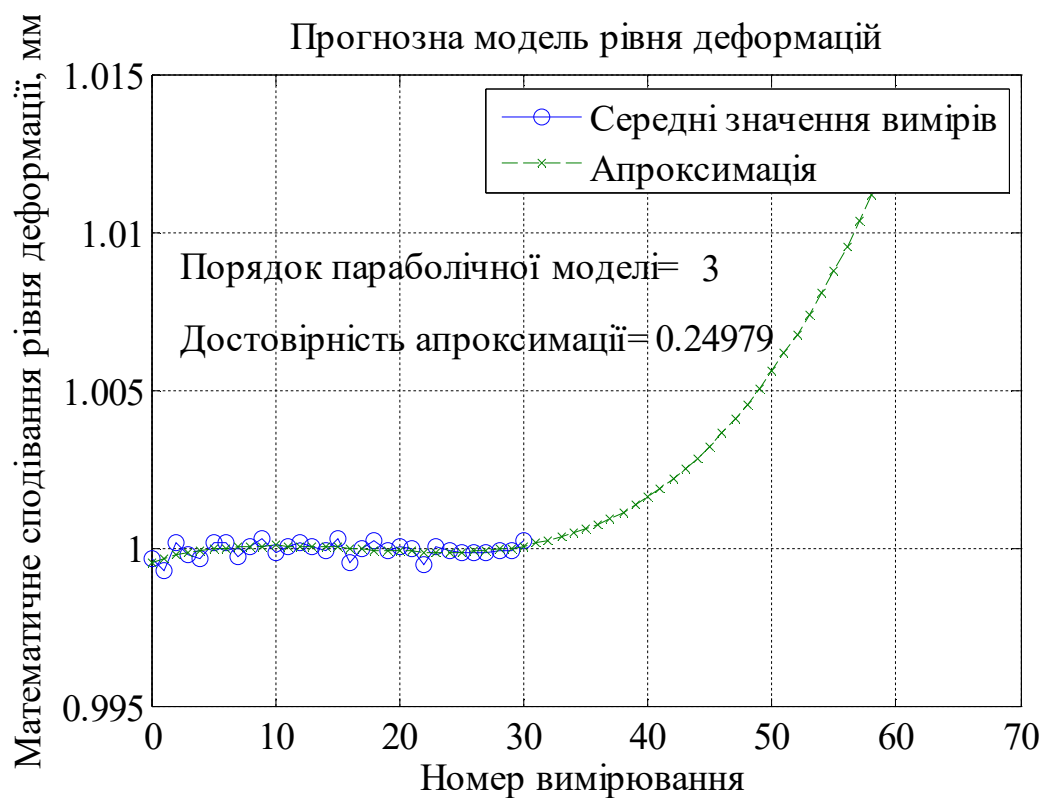


Рис. 5.8. Приклад екстраполяції тренду для результатів 31 вимірювання рівня деформацій

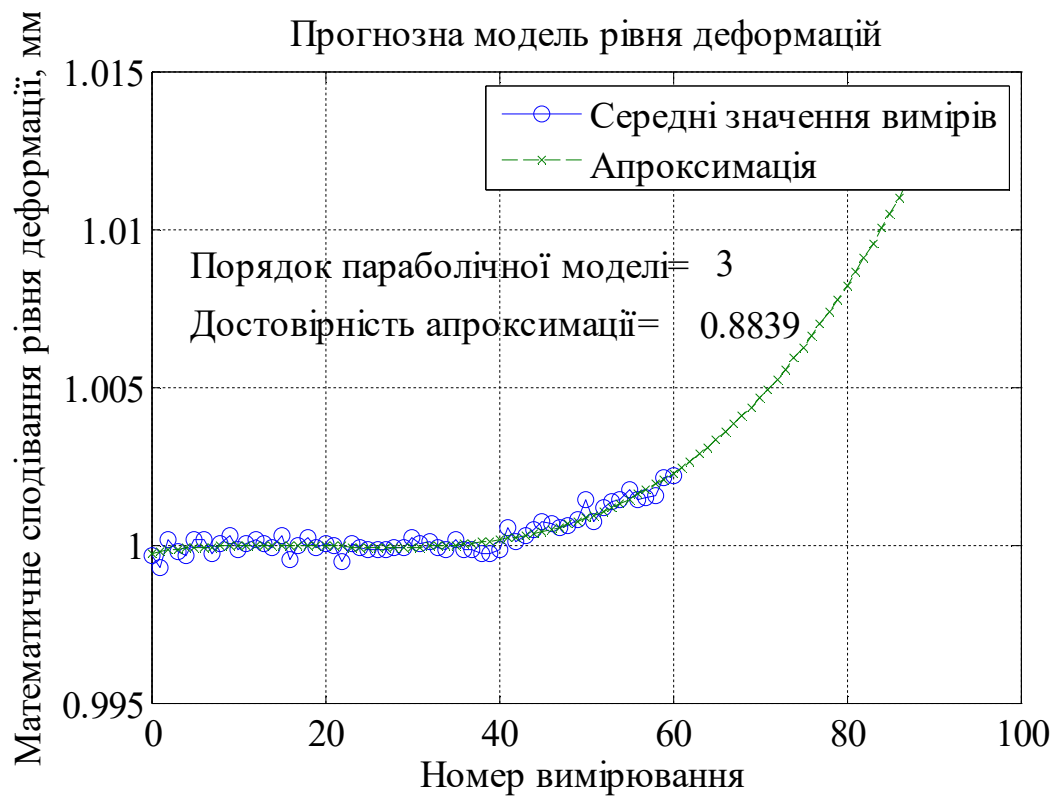


Рис. 5.9. Приклад екстраполяції тренду для результатів 61 вимірювання рівня деформацій

Таким чином, точна оцінка прогнозу носить умовний характер, що обумовлено такими факторами [2,3]:

- обрана модель тренду дає лише наближену оцінку, так як вона не є єдиною можливою;
- статистичне прогнозування здійснюється на основі обмеженого обсягу інформації;
- наявність у вихідному сигналі випадкового компонента призводить до значного зниження точності прогнозу.

При невеликій кількості вихідних даних з випадковими складовими у вигляді шуму для підвищення точності апроксимації (прогнозування) можна використовувати, наприклад, поліноми більш високих порядків, графіки яких мають більш складну форму. Недоліком такого підходу є можливість прогнозування лише декількох майбутніх значень.

У окремих випадках підвищити точність прогнозу можна за рахунок збільшення кількості вимірювань: кожне нове значення математичного сподівання рівня деформацій дає змогу більш точно розрахувати коефіцієнти апроксимуючого полінома за допомогою метода найменших квадратів.

5.3. Віртуальний прилад для опитування датчиків інформації

Організація процесу моніторингу та керування його етапами, а саме: отримання інформації; збереження та передача даних; аналіз діагностичної інформації; визначення діагностичних параметрів чи ознак; прийняття рішення про стан об'єкта; візуалізація; прогнозування стану, тощо, в системі моніторингу в програмно-апаратному комплексі, який можна вважати діагностичним сервером.

Для багатоканальних систем реалізацію діагностичного серверу доцільно виконати з використанням зовнішнього блоку аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), через який дані вимірювальних каналів передаються на комп'ютер/ноутбук, використовуючи його обчислювальні можливості для зазначених вище операцій.

Для налаштування модуля АЦП і для подальшої етапів опрацювання інформації доцільно використовувати потужні засоби обробки інформації, наприклад, MATLAB, або ж програмувати модуль за допомогою мови C/C++ [55].

Для реалізації повноцінного графічного користувацького інтерфейсу модуль підтримує взаємодію із середовищем LabVIEW, яке є середовищем розробки і платформою для виконання програм, створених на графічній мові програмування «G» фірми National Instruments (США). В даний час існують версії для UNIX, Linux, Mac OS і пр., А найбільш розвиненими і популярними є версії для Microsoft Windows.

LabVIEW використовується в системах збору та обробки даних, а також для керування технічними об'єктами і технологічними процесами.

Програма LabVIEW називається і є віртуальним приладом (англ. Virtual Instrument) і складається з двох частин:

- блок-діаграми, яка описує логіку роботи віртуального приладу;
- лицьової панелі, яка описує зовнішній інтерфейс віртуального приладу.

Блокова діаграма містить функціональні вузли, які є джерелами, приймачами і засобами обробки даних. Функціональні вузли та термінали об'єднані в єдину схему лініями зв'язків. Лицьова панель віртуального приладу містить засоби введення-виведення: кнопки, перемикачі, світлодіоди, верньєри, шкали, інформаційні табло тощо. Вони використовуються людиною для управління віртуальним приладом, а також іншими віртуальними приладами для обміну даними.

У цілому, ефективність використання середовища LabVIEW у наукових дослідженнях полягає в тому, що залишаючись у рамках програми, можна розробляти як математичну модель об'єкта, так і додавати до моделі реальні експериментальні дані, за допомогою апаратних засобів вводу-виводу, сполучених з реальним об'єктом. Крім сказаного, LabVIEW підтримує синтаксис системи MATLAB і це дає можливість використання MATLAB-коду у якості підпрограм середовища LabVIEW.

Віртуальний прилад для опитування датчиків призначений для:

- опитування датчиків (або інформаційних ліній до яких вони підключені), використовуючи бездротові інтерфейси;
- формування масивів інформації отриманої від датчиків інформації;
- обробки отриманої інформації у відповідності до заданого алгоритму;
- виводу обробленої вибірки у вигляді графічної інформації;
- збереження результатів у файл комп'ютера або на твердотільний накопичувач.

В [55] у середовищі графічного програмування LabVIEW було створено програмне забезпечення у вигляді віртуального приладу, лицьова панель якого представлена на рис. 5.10.

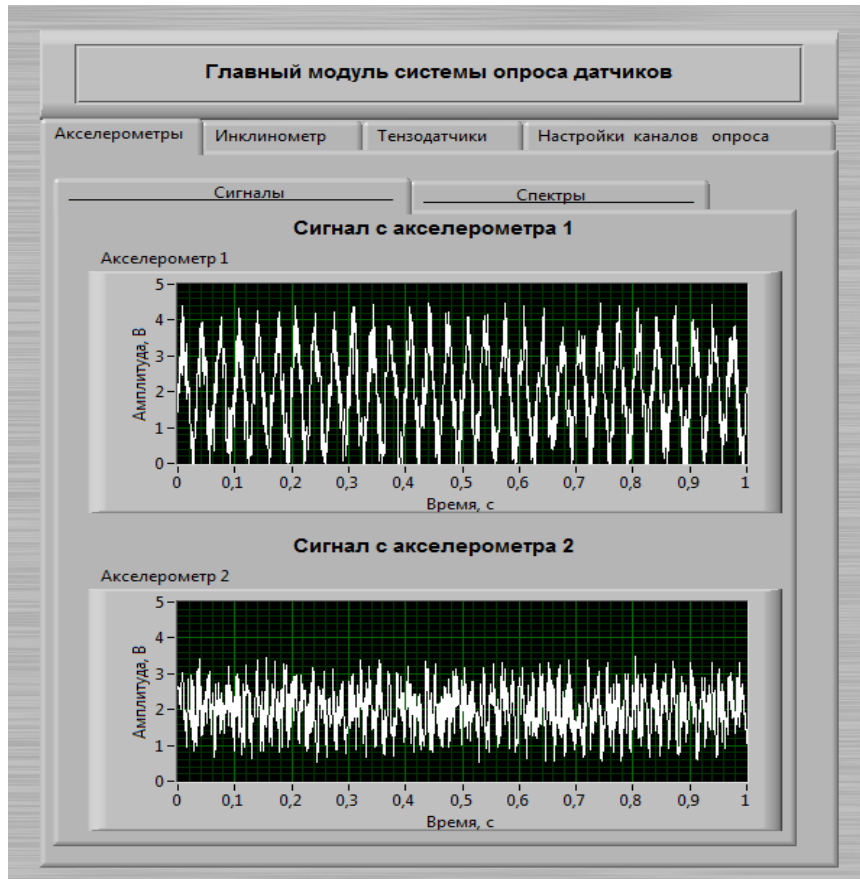
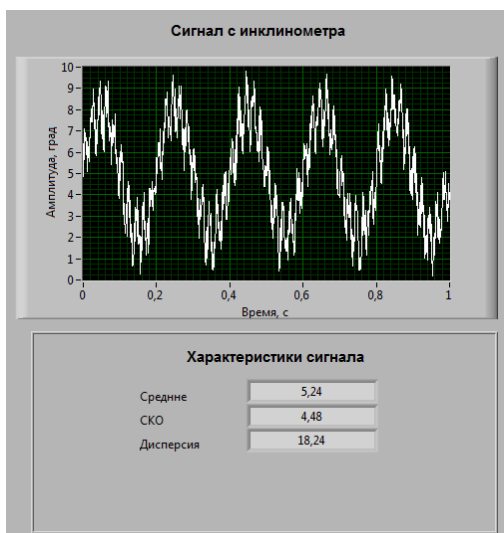


Рис. 5.10. Загальний вигляд віртуального приладу для опитування датчиків

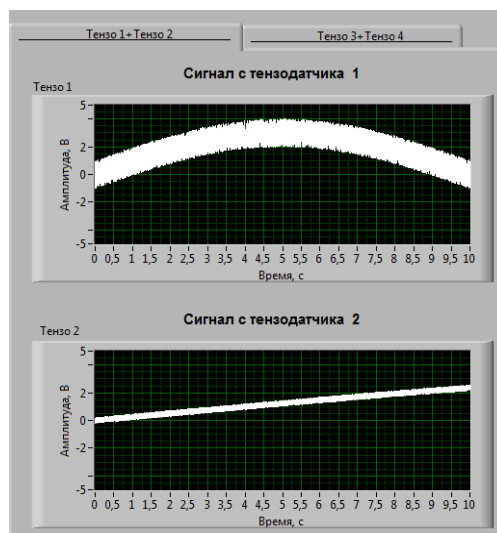
Для більш ефективного та інтуїтивно зрозумілого керування створеним програмним продуктом, інтерфейс лицьової панелі розроблений у вигляді мультивкладкової структури. У якості датчиків інформації використовуються 2 акселерометри, 4 тензорезистивні датчики та інклінометр, тому на головній лицьовій панелі створено відповідні вкладки з їх назвами, а також сервісна вкладка для конфігурації ліній опитування.

Вкладка даних акселерометрів містить вкладки для виведення їх сигналів та спектрів. Графічне вікно виводить вибірку сигналу довжиною 1с і змінюється при формуванні нового масиву даних. Частота опитування датчиків установлена значенням $f_{оп}=1024\text{Гц}$ за замовчуванням.

Вкладки даних тензометричних вимірювань та визначення кутового положення також містять вікна для виводу сформованих вибірок сигналів від відповідних датчиків та показані на рис. 5.11.



а)



б)

Рис. 5.11. Вкладки данных инклинометра (а) та тензометрів (б)

Сервісна вкладка (рис. 5.12) призначена для налаштування каналів опитування датчиків, в ній забезпечується сигналізація про підключення датчиків до лінії обміну, встановлення частоти опитування по групах датчиків, примусове відключення автоматичного запису вибірок отриманої інформації по групах датчиків, вибір каналу прийняття інформації.

Статус датчиков

Акселерометр 1 ☒

Акселерометр 2 ☒

Инклинометр ☒

Тензо 1 ☒

Тензо 2 ☒

Тензо 3 ☒

Тензо 4 ☒

Частота опроса датчиков

Акселерометры Гц

Инклинометр Гц

Тензодатчики Гц

Запись в файл

Акселерометры ☒

Инклинометр ☒

Тензодатчики ☒

Настройки каналов передачи

Выбор канала приема

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Размер пакета

Бит

Information

Рис. 5.12. Сервісна вкладка для налаштування каналів опитування

5.4. Віртуальний прилад для передачі, збереження та аналізу діагностичних даних

Крім програмного забезпечення для реалізації опитування датчиків інформації в системі моніторингу резервуарів, в [55] було розроблено та програмно реалізовано окремий віртуальний прилад для передачі, збереження та аналізу діагностичних даних вібраційних вимірювань.

Прилад має можливість синхронного багатоканального зчитування даних з вказаною частотою опитування (частотою дискретизації), при якому отримані дані відображаються на екрані у вигляді осцилограми. Для плати АЦП E14-140 максимальна частота дискретизації становить 100кГц на один канал, якщо зчитувати дані з двох каналів, то максимальна частота дискретизації буде 50кГц на канал, і т.д. Користувач має можливість задати необхідну частоту дискретизації, розмір внутрішнього буфера, в який будуть надходити дані при читанні з модуля і розмір пакета. Розмір пакета визначає розмір порції даних у двобайтових словах, одержаних від модуля АЦП за один цикл обміну. Всі інші параметри збору даних для заданої частоти дискретизації встановлюються автоматично.

При реалізації функції розгортки сигналу за часом застосовано найпростіший алгоритм рівномірного проріджування масиву, тобто для відображення сигналу при великій ціні ділення за шкалою часу відкидається частина точок вихідного масиву, оскільки розширення екрану обмежено. Хоча застосування подібного алгоритму може призвести до порушення критерію Найквіста і як наслідок може виникнути ефект накладення спектрів. Після запуску віртуального приладу на екрані відображаються досліджувані сигнали.

У віртуальному приладі реалізовано такі можливості:

- увімкнення/вимикання необхідного каналу кнопками «CHANNEL ON»;
- змінювання масштабу сигналу за амплітудою перемикачами «VOLTS/DIV»;
- змінювання масштабу сигналу за часом перемикачем «SEC/DIV»;
- зміщення сигналу по вертикалі регулятором «POSITION» і повернення його у нульове положення кнопками «ZERO»;
- зміщення сигналу по горизонталі регулятором «POSITION», точне положення відображається індикатором внизу регулятора;

- установки рівня тригера регулятором «TRIG LEVEL»;
- зупинки/запуску збору даних кнопкою «STOP/RUN»;
- вимкнення віртуального приладу кнопкою «POWER».

Для реалізації спектрального аналізу вібраційних сигналів у віртуальному приладі використано функцію Spectral Measurements Express VI, приклад відображення сигналів і їх спектрів на лицевій панелі віртуального приладу наведено на рис. 5.14.

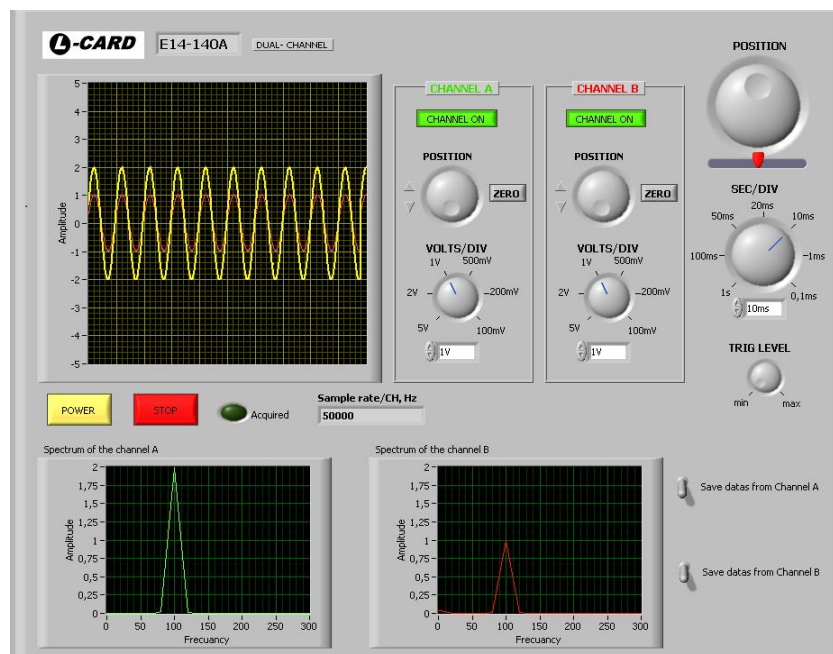


Рис. 5.14. Приклад відображення гармонічних сигналів і їх спектрів

Налаштування параметрів виводу сигналу включає в себе: налаштування масштабу сигналу за амплітудою і часом; налаштування розширення вікна виводу графіків сигналів; установлення рівня тригера; налаштування величини зміщення сигналу по вертикалі; налаштування величини зміщення сигналу по горизонталі.

Перемикачі на лицевій панелі віртуального приладу надають можливість вмикати/вимикати запис даних для кожного з каналів. Для запису масиву даних було використано функцію Write To Measurement File. Запис даних відбувається у файл з розширенням lvm, який можна відкрити у звичайному текстовому редакторі. Назва і розміщення файлу вказується у налаштуваннях функції «Write To Measurement File». Для кожного каналу створюється окремий файл.

6. РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАКЕТНОГО ЗРАЗКУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

6.1. Макетний зразок системи моніторингу

Відповідно до узагальненої функціональної схеми системи структурного моніторингу резервуарів, яку наведено на рис. 4.1, в [3,34] було розроблено макети вимірювальних каналів системи. Функціональну схему макету системи, що має вібраційний, інклінометричний та тензометричний вимірювальні канали, наведено на рис. 6.1. Сигнали з датчиків вібраційного та інклінометричного каналів передаються на діагностичний сервер (ПК) після перетворення в АЦП. Тензометричний канал реалізується на основі тензорезистивних датчиків, що підключені за напівмостовою схемою до тензометричного перетворювача Куова UCAM-1А, дані з якого передаються на ПК.

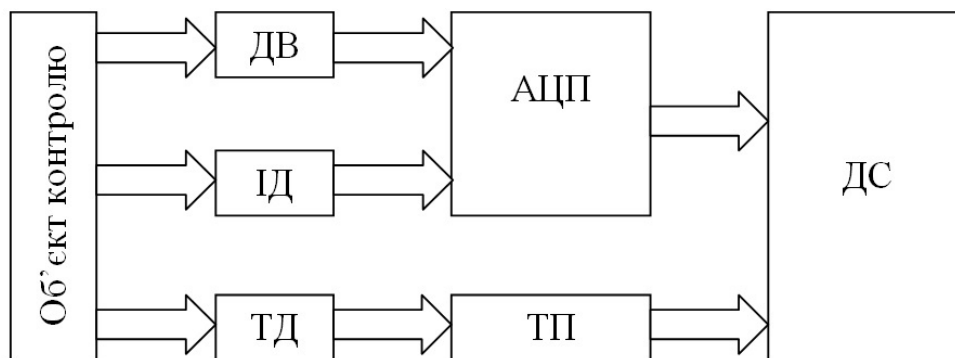


Рис. 6.1. Функціональна схема макету системи моніторингу: ВД – вібраційні датчики; ІД – інклінометричні датчики; ТД – тензометричні датчики; ТП – тензометричний перетворювач; ДС – діагностичний сервер (ПК)

В якості об'єкта контролю використано фізичну модель резервуару – вертикальний сталевий резервуар циліндричної форми, об'ємом $0,04\text{м}^3$, що складається з корпусу та кришки, фото якого зображено на рис. 5.1,а. Резервуари подібного типу використовуються для зберігання екологічно-

небезпечних речовин, таких як: нафта/нафтопродукти, хімікати, токсичні речовини, газу, тощо.

6.1.1. Макет каналу вимірювання вібрації

Макет каналу вимірювання вібрації системи моніторингу (рис. 6.2) був реалізований відповідно до наведеної вище функціональної схеми макету системи. Як датчики первинної інформації використано два закріплені в корпусі електромеханічних акселерометри MS8002.D фірми Colibrys, технічні характеристики яких наведено в табл. 6.1 [3,34]. Плати з датчиками розміщені в корпусі так, що вимірювальні осі акселерометрів є ортогональними. Під дією прискорення інерційні маси датчиків зміщуються відносно положення своєї рівноваги, це зміщення перетворюється у відповідний електричний сигнал і передається на 14-розрядний АЦП m-DAQ-14, за допомогою якого вхідні аналогові сигнали перетворюються в дискретний код і передаються в ПК для аналізу. Головне завдання вібраційного каналу полягає у визначенні та контролі вібраційних характеристик резервуара.



Рис. 6.2. Фізична модель резервуару з датчиком вібрації

Таблиця 6.1

Технічні характеристики датчика MS 8002.D

Параметри	Значення
Діапазон вимірювань	$\pm 2g$
Чутливість	1000mB/g
Напруга живлення	2,5...5,5В
Струм	400мкА
Діапазон робочих температур	-55°...+125°С
Маса	1,64г
Кількість осей чутливості	1
Резонансна частота	1,4кГц

Перед монтажем корпусу з датчиками на резервуар було проведено калібрування акселерометрів методом тестових поворотів [3,34].

Акселерометр вимірює проекцію лінійного прискорення об'єкта, на якому він встановлений, на свою вимірювальну вісь [34], зокрема, акселерометр вимірює уявне прискорення

$$a = W - g, \quad (6.1)$$

де W – вектор абсолютного лінійного прискорення, g – гравітаційне прискорення.

Якщо вимірювальною віссю акселерометра є вісь Z , то вихідний сигнал акселерометра U_{az} , повинен бути пропорційним проекції уявного прискорення (6.1) на вісь Z :

$$U_{az} = k_z \cdot a_z, \quad (6.2)$$

де k_z – спільний передатний коефіцієнт (масштабний коефіцієнт), що включає передатний коефіцієнт датчика переміщень інерційної маси акселерометра, передатні коефіцієнти підсилювача та інших можливих перетворювачів ланцюга.

В дійсності кожен окремий екземпляр акселерометра має свої індивідуальні особливості, що впливають на значення масштабного коефіцієнта, зміщення нуля, перехресних зв'язків та інших параметрів. Для забезпечення високої точності системи моніторингу необхідно мати високоточну інформацію від вимірювачів, що може бути забезпечено тільки за умови урахування вказаних особливостей кожного акселерометра.

Для цього спочатку складається адекватна модель вихідного сигналу акселерометра, що враховує його особливості та похибки, потім визначають-

ся параметри цієї моделі. У подальшому, при штатній роботі системи, вихідний сигнал акселерометра перетворюється з урахуванням прийнятої моделі, щоб максимально точно визначити проекції уявного прискорення вздовж базових осей системи.

Визначення параметрів вихідних сигналів вимірювачів (параметрів їх математичних моделей) з метою подальшого їх урахування називають – калібруванням. У загальному випадку, залежність вихідного сигналу акселерометра від прискорення, що вимірюється, є нелінійною, та допускає лінеаризацію тільки для обмеженого діапазону прискорень. Розглянемо тільки лінійну модель акселерометрів. Доповнимо ідеальну модель вихідного сигналу акселерометра наступними складовими [3,34]:

- зміщення нуля акселерометра U_{az0} ;
- коефіцієнти перехресної чутливості k_{zx} , k_{zy} ;
- шум вимірювання n_{az} .

Тоді вихідний сигнал акселерометра (6.2) матиме вигляд:

$$U_{az}=k_z a_z+k_{zx} a_x+k_{zy} a_y+U_{az0}+n_{az}; \quad (6.3)$$

модель вимірювань (6.3) – це модель не чутливого елемента акселерометра, а модель всього вимірювального тракту, що включає сам чутливий елемент, а також вимірювальні, підсилюючі та перетворюючі елементи.

Калібрування акселерометрів в діапазоні $\pm 1g$ здійснюється шляхом надання відомих положень акселерометра відносно вектора прискорення сили тяжіння g . Для високоточного надання положення акселерометра відносно вектора сили тяжіння g , використовується прецизійна оптична ділильна головка (ОДГ), що забезпечує точність повороту акселерометра на рівні приблизно 5-10 кутових секунд. Для зменшення впливу від зовнішніх коливань, добових коливань споруд та інших механічних взаємодій, ОДГ встановлюють на спеціальний фундамент, що є розв'язаним відносно споруди, в якій знаходиться калібрувальна ділянка.

Вимірювальний модуль, або інший прилад, в якому встановлено акселерометр, повинен мати щонайменше дві перпендикулярні базові поверхні, які і формують базові осі приладу. Вимірювальний модуль встановлюється однією зі своїх баз на площадку ОДГ і притискається другою базою до однієї з бокових баз площадки. Таким чином забезпечується паралельність однієї з осей вимірювального модуля відносно осі обертання ОДГ.

Для здійснення калібрування вісь обертання ОДГ і базова платформа виставляються в горизонті також з похибкою до 5-10 кутових секунд з вико-

ристанням прецизійних рідинних рівнів. Це дозволяє з високою точністю зорієнтувати базові осі вимірювального модуля, а значить, і акселерометра відносно вектора прискорення сили тяжіння g .

Запишемо більш детально вираз (6.1) для уявного прискорення, підставивши туди вираз для абсолютного лінійного прискорення W в супроводжуючому географічному триграннику [34]:

$$a = \frac{dV}{dt} + (\omega \times U) \times V + U \times (U \times r) - g', \quad (6.4)$$

де V – вектор лінійної швидкості руху об'єкта відносно Землі; U – вектор кутової швидкості обертання Землі, r – радіус-вектор, що задає положення центру мас об'єкта відносно центру Землі; ω – абсолютна кутова швидкість повороту супроводжуючого географічного тригранника.

Врахуємо, що дві останні складові у виразі (6.4) формують вектор прискорення сили тяжіння:

$$g = g' - U \times (U \times r).$$

Тоді вираз (6.4) для уявного прискорення буде мати вигляд

$$a = \frac{dV}{dt} + (\omega \times U) \times V - g, \quad (6.5)$$

де остання складова вже не гравітаційне прискорення, а прискорення сили тяжіння.

У фіксованих положеннях, що задаються за допомогою ОДГ, акселерометр залишається нерухомим відносно Землі, тому у виразі (6.5) врахуємо $V=0$, $\frac{dV}{dt} = 0$, тоді уявне прискорення, яке вимірює акселерометр, буде дорівнювати прискоренню сили тяжіння, що береться з протилежним знаком [34]:

$$a = -g. \quad (6.6)$$

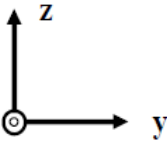
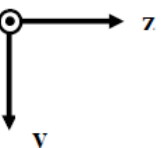
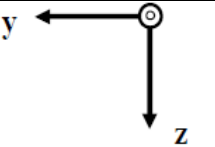
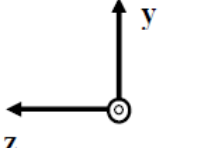
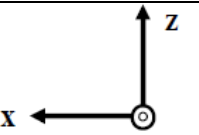
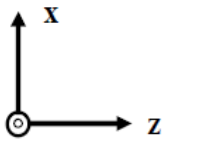
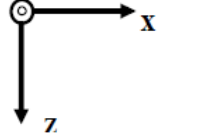
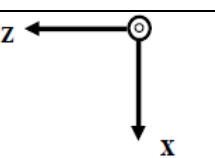
Для повного калібрування акселерометра, його необхідно обертати навколо двох осей. Для визначення параметрів моделі (6.3) вихідних сигналів акселерометрів необхідно задавати відомі положення a_x , a_y , a_z по кожній з трьох осей X , Y , Z , а це означає, що кожна з трьох осей повинна змінювати своє положення відносно вектора g . При повороті акселерометра на ОДГ навколо однієї осі, ця вісь не змінює своє положення відносно вектора g , тому акселерометр переставляють на ОДГ, змінюючи вісь обертання.

В табл. 6.2 наведено значення проекцій уявного прискорення (6.6) на осі акселерометра для кожного положення з урахуванням того, що вектор g направлено вертикально вниз. Підставивши значення проекцій уявного при-

скорення a_x , a_y , a_z з табл. 6.2 у вираз (6.3), отримаємо значення вихідного сигналу акселерометра U_{az} для кожного з положень.

Таблиця 6.2

Значення вихідного сигналу акселерометра U_{az}

№	Положення осей акселерометра	Кут за шкалою ОДГ	Проекції g	Проекції уявного прискорення	Вихідний сигнал акселерометра
Обертання навколо осі X					
1		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{az1} = k_z g + U_{az0}$
2		90°	$g_x = 0$ $g_y = g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = -g$ $a_z = 0$	$U_{az2} = -k_{zy} g + U_{az0}$
3		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{az3} = -k_z g + U_{az0}$
4		270°	$g_x = 0$ $g_y = -g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = g$ $a_z = 0$	$U_{az4} = k_{zy} g + U_{az0}$
Обертання навколо осі Y					
5		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{az5} = k_z g + U_{az0}$
6		90°	$g_x = -g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{az6} = k_{zx} g + U_{az0}$
7		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{az7} = -k_z g + U_{az0}$
8		270°	$g_x = g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = -g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{az8} = -k_{zx} g + U_{az0}$

Для суттєвого зменшення впливу шуму вимірювань p_{az} , вихідний сигнал акселерометра осереднюється протягом часу вимірювання (у даному випадку 20 с), тому шум вимірювань p_{az} з виразу (6.3) не враховується. Так, як початковою розмірністю вихідних сигналів є – код АЦП, то для більшої зручності розрахунків вихідні сигнали були переведені в вольти.

Параметри моделі (6.3) вихідних сигналів акселерометрів визначаються за формулами [34]:

- Для 1-го акселерометра:

$$k_y = (U_{ay4} - U_{ay2} + U_{ay6} - U_{ay8}) / 4g; \quad k_{yx} = (U_{ay7} - U_{ay9}) / 2g;$$

$$k_{yz} = (U_{ay1} - U_{ay3}) / 2g; \quad U_{ay0} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{ayi}.$$

- Для 2-го акселерометра:

$$k_z = (U_{az3} - U_{az1} + U_{az7} - U_{az5}) / 4g; \quad k_{zx} = (U_{az6} - U_{az8}) / 2g;$$

$$k_{zy} = (U_{az4} - U_{az2}) / 2g; \quad U_{azo} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{azi}.$$

Результати розрахунків параметрів калібрування наведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Результати калібрування акселерометрів

Тип акселерометра	Акселерометр	Результати калібрування			
		$k_{ij} = [B \cdot c^2/M] ; U_{ai} = [B]$			
Colibrys MS8002.D	Y	$k_y=0,1004$	$k_{yx}=-0,0023$	$k_{yz}=-0,0015$	$U_{ay0}=-0,013$
	Z	$k_z=0,1005$	$k_{zx}=-0,0005$	$k_{zy}=-0,0009$	$U_{az0}=-0,0109$

6.1.2. Макет каналу вимірювання кутового положення

У макеті каналу вимірювання кутового положення (інклінометричного каналу) у якості інклінометричного датчика використано акселерометр MS 8002.D фірми Calibrys, той самий, що використовувався у каналі вимірювання вібрації. Це дозволяє з одного датчика отримувати інформацію як про вібраційні характеристики об'єкта так і про кути його нахилу (просторового положення) [3].

Суттєва відмінність між вібраційним та інклінометричним каналом пов'язана з обробкою отриманих з акселерометрів сигналів. Адже для визна-

чення просторового положення необхідно враховувати нахил осі чутливості датчиків відносно вектору прискорення сили тяжіння.

Дослідження залежності вихідного сигналу інклінометричного каналу від кутів нахилу об'єкта проводились після калібрування акселерометрів, яке було описано вище.

Перед проведенням експериментальних досліджень нормальну вісь корпусу блоку акселерометрів за допомогою рідинного рівня було виставлено по вертикалі місця, похибка не перевищувала чотири кутових хвилини. Відповідно, вісь першого акселерометра спрямована по осі вертикалі, а вісь другого – перпендикулярна вертикальній осі.

6.1.3. Макет каналу тензометричних вимірювань

Чутливими елементами каналу тензометричних вимірювань є тензорезистори, в макеті каналу вимірювання деформації використовувались тензорезистори КФ5П1 10 100 А 12 С1 компанії Веда, характеристики яких наведено у таблиці 6.4 [3].

Таблиця 6.4

Характеристики тензорезисторів КФ5П1 10 100 А 12 С1

База, мм	10
Чутливість, мкм/м	від 1,9 до 2,3
Граничне відхилення електричного опору в партії (10 000 шт.),%	$\pm 1,0$
Максимальна вимірювана деформація, мкм / м	± 3000
Температурний діапазон роботи, °С	від - 70 до + 200

Тензорезистори виконані у вигляді одиночного прямокутного перетворювача з фольговою решіткою (константант) та призначені для вимірювання одновісних деформацій згину, розтягнення і стиснення. Цифра 12 в назві означає закладений в тензорезистор коефіцієнт термокомпенсації для розширення такого металу як сталь.

Сигнали з тензорезисторів надходять до тензометричного перетворювача, який в макеті реалізується пристроєм фірми Куова типу UCAM-1А. Цей пристрій дозволив реалізувати підключення за різними схемами мосту

Уїтстона. Оскільки внутрішня частина стінки резервуару є недоступною для встановлення тензорезисторів, найбільш прийнятним варіантом є напівмостова схема включення, яка дозволяє реалізувати схему температурної компенсації. Необхідність компенсації обумовлена суттєвим впливом низьких температури на характеристики металів, що підтвердилось проведеними дослідженнями впливу зміни температури на чутливість тензорезистору. Дослідження проводилось за виразом [3]:

$$F(t)=1+B_K(t-t_H) \quad (6.7)$$

де: B_K - значення температурного коефіцієнту (0,15); t - поточна робоча температура; t_H - нормальна температура.

Отримана за виразом (6.7) залежність є лінійною, що обумовлено використанням в якості чутливого елементу константанту. Варіюючи присадками константанових сплавів (або за допомогою відпалювання), можна отримувати задані значення температурного коефіцієнту опору, що дозволяє створювати термокомпенсування тензорезисторів при установці їх на деталі з різними температурними коефіцієнтами розширення.

6.1.4. Лінії зв'язку

Канали зв'язку бувають дротовими та бездротовими, останньому при розробці макетного зразку системи моніторингу було надано перевагу, що зумовлено такими його характерними особливостями [3]:

- працює на достатніх відстанях (10 - 100 м);
- набагато менше часу витрачається на його розгортання, особливо в складних умовах;
- більш гнучкий та мобільний;
- підтримує сучасні технології передачі даних.

Передача даних від блоку АЦП до ПК в системі може здійснюватись за допомогою обладнання WiMIC-6000 стандарту IEEE 802.16-2004 WiMAX для безпроводної передачі даних. Діагностична інформація від датчиків інформації до блоку АЦП передається по коаксіальному кабелю.

При передачі сигналу по лінії зв'язку він спотворюється і відтворюється з деякою похибкою. Причиною таких похибок є спотворення сигналів в каналі зв'язку і перешкоди, які впливають на сигнал [67]. Спотворення часто обумовлені відомими характеристиками лінії зв'язку і тоді можуть бути усунені шляхом належної корекції. Але більшість шумів заздалегідь невідомі і

тому не можуть бути повністю усунені. У зв'язку з цим необхідно перевірити роботу ліній зв'язку в макеті системи і оцінити вплив перешкод на корисний сигнал під час його передачі.

Відокремити шум каналів вимірювальної системи від діагностичних сигналів у реальних умовах практично неможливо. Тому було проведено натурні вимірювання каналів зв'язку, які показали, що у діапазоні частот 0,1...40 Гц зареєстрований спектральний склад сигналу практично близький до нормального випадкового процесу з середніми рівнями $2 \cdot 10^{-7} \text{g}$ і максимальними значеннями складових спектра, що не перевищують $6 \cdot 10^{-7} \text{g}$. Порівнюючи отримані характеристики з характеристиками використаних акселерометрів, можна зробити висновок, що канали зв'язку не будуть вносити додаткових похибок, суттєвих для результатів вимірювання.

6.1.5. Перетворюючий пристрій

В якості перетворюючого пристрою в системах діагностики використовуються АЦП. Найбільш популярними серед них є паралельні, послідовні та сигма - дельта АЦП. У результаті проведеного в [3] аналізу характеристик різник типів АЦП (розрядність, частота дискретизації, дозвіл, економічність та швидкість перетворення), було прийнято рішення про використання АЦП послідовного наближення.

Для перетворення діагностичних даних в системі моніторингу та прогнозування обрано АЦП Е 14-440, який має такі переваги:

- фізичний номер аналогового каналу;
- можливість налаштування числа, частоти і послідовності опитування вхідних каналів, діапазонів вимірювання, частоти перетворення АЦП;
- синхронізація збору даних;
- наявність цифрового сигнального процесора;
- для кожного каналу можна встановити свій індивідуальний коефіцієнт підсилення.

Розрахуємо роздільну здатність АЦП в діапазоні $\pm 5\text{В}$:

$$D = \frac{R}{V} = \frac{10}{16384} = 0,0006 \text{ В} = 0,6 \text{ мВ} ,$$

де R – вхідний діапазон АЦП; V – розрядність АЦП.

Як показав отриманий результат розрахунку, сумарний шум (вноситься перешкода) всієї аналогової частини між джерелом сигналу та входом АЦП не повинен перевершувати значення 0,6 мВ, щоб АЦП його не зафіксував.

Значення шуму визначає, скільки молодших біт вихідного сигналу може бути зіпсовано за рахунок шуму самої мікросхеми. Джерелами шуму, зокрема, можуть бути логіка зчитування результату перетворення в самій мікросхемі АЦП і джерело опорної напруги (ДОН). Оскільки у більшості мікросхем ДОН зовнішній і є окремою мікросхемою, то джерелами шуму можуть стати з'єднувальні ланцюги.

За звичай, мікросхема АЦП спроектована таким чином, щоб сума її власних шумів не перевищувала ваги молодшого зваженого розряду (МЗР). Це означає, що АЦП своїх шумів «не чує», тому джерелом шуму може стати або ДОН, або друкована плата.

В роботі [3] було проведемо дослідження метрологічних характеристик АЦП E14-440 виробництва ЗАТ "Л-Кард". Зокрема, проаналізовано похибки АЦП від частоти дискретизації при вимірюванні і перетворенні напруги постійного струму, похибки при різних схемах підключення, похибки від опору джерела сигналу, вплив між канального проходження.

6.2. Лабораторні випробування каналу вимірювання вібрації

6.2.1. Методика випробувань

Дані каналу вимірювання вібрації є одними з найважливіших, оскільки саме можуть містити у собі основні діагностичні ознаки. При експлуатації резервуарів параметри та характеристики вібрації елементів конструкції визначаються за даними вимірювань, які є реакцією елементів конструкції на динамічне збурення резервуару і місця його встановлення природного чи техногенного походження. Тобто, вимірювані сигнали вібрації характеризують вимушені коливання резервуару та його елементів конструкції. В розділах 2 та 3 динаміка створеної дискретної моделі резервуару досліджувалась шляхом аналізу форм та частот власних коливань. Такі коливання можуть бути збуджені короткочасним імпульсним впливом (сейсмічним, вітровим збуренням, тощо). Тому при проведенні лабораторних випробувань фізичної моделі резервуару і макету каналу вимірювання вібрації використовувався діагностичний метод вільних коливань, який полягає в ударному (імпульс-

ному) збуренні вільно згасаючих коливань (імпульсного відклику) об'єкта та подальшому аналізі їх характеристик. Зміну поточного функціонального стану резервуару забезпечено різними рівнями наповнення резервуару рідиною. Всього було п'ять рівнів наповнення: порожній резервуар (0); наповнення на 1/4 об'єму; наповнення на 1/2 об'єму; наповнення на 3/4 об'єму; повністю наповнений резервуар.

Вібраційні сигнали з каналу вимірювання вібрації було отримано за такою методикою вібраційних випробувань [3,34,68]:

- 1) Перевірити коректність роботи каналу вимірювання вібрації.
- 1) Встановити блок акселерометрів на одній з попередньо розмічених на резервуарі точок закріплення датчиків вимірювання віброприскорення. Встановлення повинно задовольняти вимогам ГОСТ Р ІСО 5348-99.
- 2) Збудити вільні коливання резервуара, приклавши імпульсний вплив уздовж осі чутливості акселерометра та перпендикулярно їй. Зафіксувати отримані дані.
- 3) Пункт (3) повторити 5-10 разів для забезпечення повноти аналізу.
- 4) Блок акселерометрів перемістити на іншу точку і повторити пункти (2)-(4).
- 5) Змінити поточний стан резервуара шляхом його наповнення рідиною.
- 6) Пункти (2)-(6) повторити для кожного рівня заповнення резервуара рідиною.

6.2.2. Результати випробувань та їх аналіз

Згідно до описаної вище методики було отримано дані з восьми точок на резервуарі, які було обрано як точки вимірювання. Приклад отриманих сигналів, що відображають відклик резервуару на імпульсний вплив, наведено на рис. 6.3. Для забезпечення коректності аналізу отриманих результатів у кожній з точок було проведено по десять вимірювань. Таким чином, при вимірюванні вібраційних сигналів з резервуару в усіх восьми точках з урахуванням двох видів імпульсного впливу (паралельно та перпендикулярно осі чутливості датчика, що лежить в площині горизонту) було отримано 320 вибірок даних для кожного з рівнів заповнення баку [3]. Враховуючи кількість рівнів наповнення резервуару, під час лабораторних випробувань отримано

1600 вибірок вібраційних сигналів. Інформація про імпульсний відклик знімалась з частотою 2 кГц, кожна вибірка містить в собі 4096 точок.

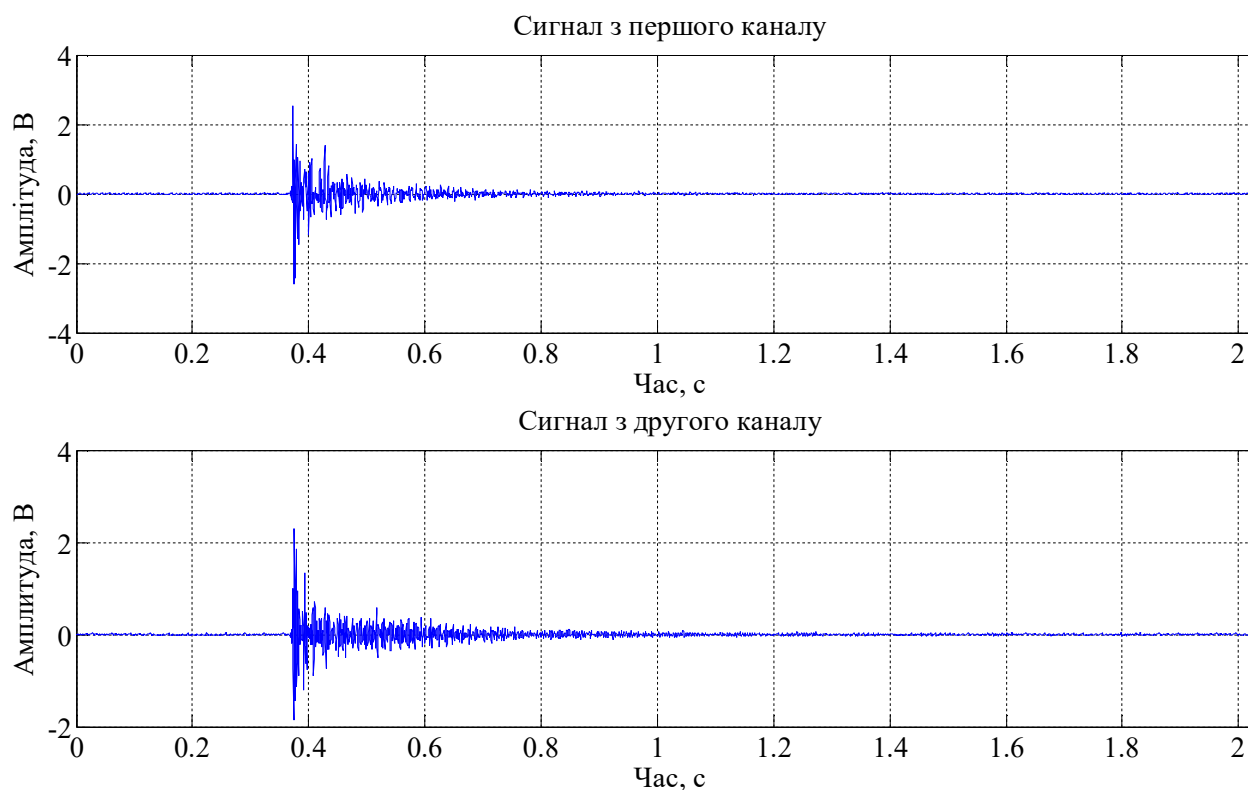


Рис. 6.3. Приклад вібраційних сигналів, отриманих з резервуару при імпульсному збудженні

Часову реалізацію шумів АЦП і результат їх спектральної обробки наведено на рис. 6.4, спектральний аналіз показав, що максимальний рівень шуму досягає -84 дБ на частоті 6 Гц, а середній рівень шумів АЦП становить -98 дБ. На підставі проведеного аналізу сигналів шуму АЦП в програму обробки вібраційних сигналів був внесений додатковий модуль попередньої обробки, що виконує обчислення середнього значення вимірювального шуму за першими 512 точками сигналу до збудження коливань в резервуарі з подальшим його вирахуванням з корисного сигналу для виключення зі спектрів складової на нульовій частоті. Це необхідно для визначення кута відхилення блоку акселерометрів від вертикальної і горизонтальної площин при його закріпленні на резервуарі.

Спектр сигналу вібрації, отриманого при імпульсному збудженні коливань уздовж осі чутливості акселерометра, що знаходиться в горизонтальній площині (перший канал), наведено на рис. 6.5. Вісь чутливості другого аксе-

лерометра (другий канал) розташована в ортогональній площині і спрямована вертикально вгору.

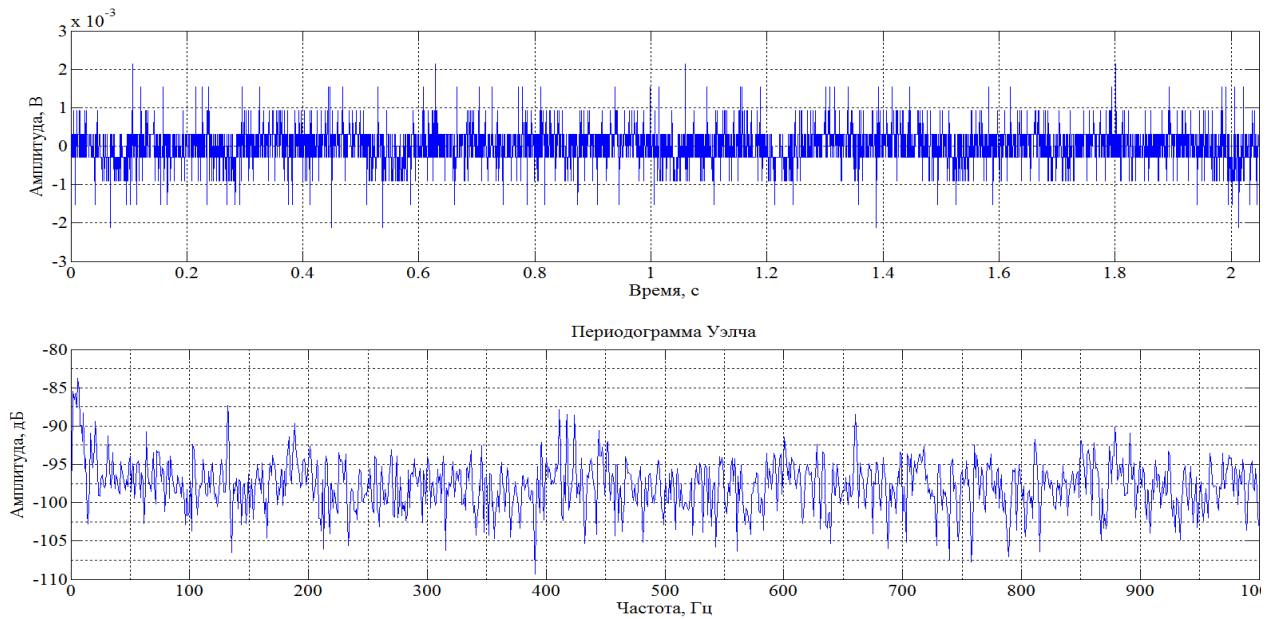


Рис. 6.4. Шуми АЦП у часовій і частотній областях

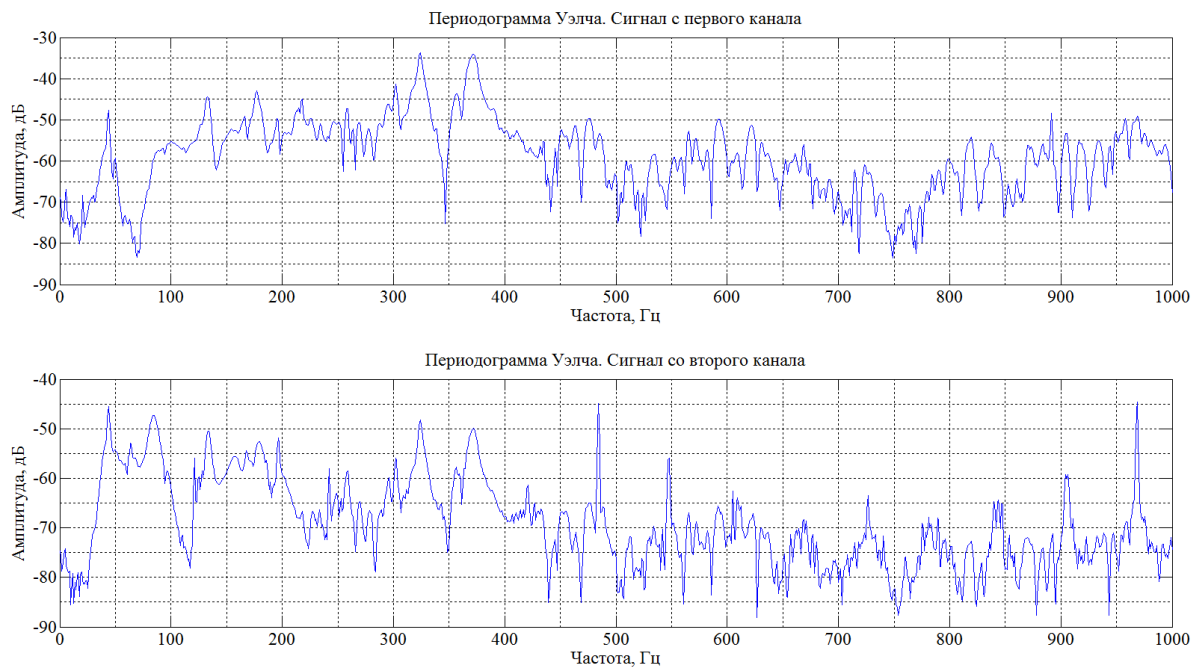


Рис. 6.5. Периодограмма Уелча импульсного відклику резервуару при ударі уздовж осі чутливості акселерометра

Аналіз періодограми Уелча показав, що для коливань в горизонтальній площині домінуючими є дві складові на частотах 324Гц і 371Гц і рівнями -33дБ і -34дБ, відповідно, середній рівень періодограми становить -60дБ. Останнє дозволяє зробити висновок, що шуми АЦП не впливають на результати.

Для порівняльного аналізу було проведено скінчено-елементний модальний аналіз резервуара у програмному комплексі ANSYS. Скінчено-елементна модель містила 480 тисяч елементів. Визначено частоти коливань моделі для перших двадцяти форм коливань. Результати модального аналізу наведені в табл. 6.5, а приклади коливань – на рис. 6.6 [34,68].

Таблиця 6.5

Результати модального аналізу спрощеної моделі резервуару

Форма коливань	Частота, Гц	Форма коливань	Частота, Гц
1	303,81	11	745,63
2	303,81	12	745,64
3	407,62	13	780,91
4	407,62	14	780,93
5	414,4	15	908,99
6	414,43	16	909,03
7	559,43	17	931,02
8	559,44	18	931,04
9	742,77	19	965,38
10	742,83	20	965,42

Порівняльний аналіз скінчено-елементного та фізичного моделювання дозволив встановити, що в результаті імпульсного збурення коливання фізичної моделі об'єкта відбуваються в горизонтальній площині за першими двома формами коливань, а у вертикальній площині – за 19-ю та 20-ю формами незалежно від напрямку прикладення збурення. Відносна похибка визначення частоти коливань за першою формою чисельними методами та експериментально не перевищує 6,3%.

Рівень наповненості резервуару є однією з важливих характеристик, які впливають на його поточний технічний стан. Проведене в п. 2.2 дослідження показало, що при збільшенні чи зменшенні рідини відповідно відбувається збільшення чи зменшення статичного навантаження на стінки і днище резерву-

ару, що призводить до зміни параметрів його напружено-деформованого стану та вібраційних характеристик.

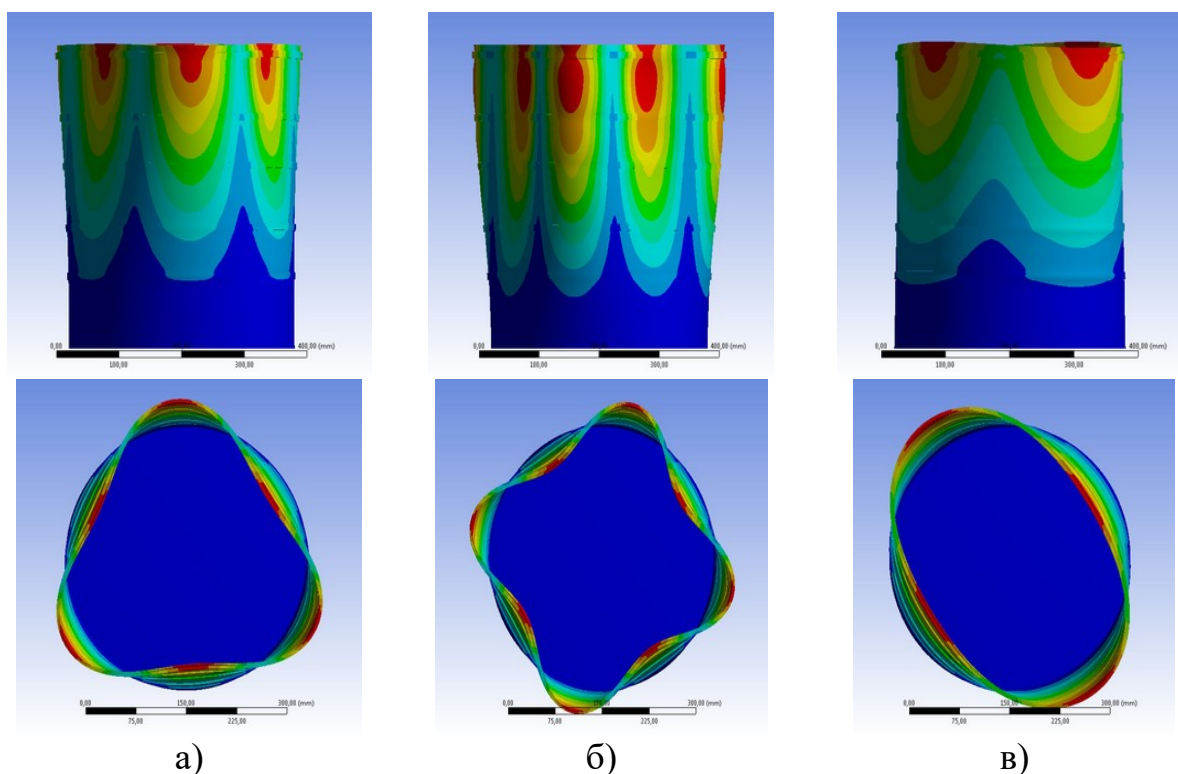


Рис. 6.6. Приклади коливань спрощеної моделі резервуару для першої (а), третьої (б) та п'ятої (в) мод

Для вибірок вібраційних сигналів, отриманих для різних рівнів наповнення резервуару проведено їх аналіз за розглянутим в п. 4.4. методом Штейгліца-Макбрайда. Попередньо проведені дослідження показали [58], що для обробки вібраційних даних необхідно прийняти значення α . За результатами отриманими в процесі імітаційного моделювання вихідних сигналів (розділ 3) було визначено, що для обробки вимірних даних доцільно використовувати метод Штейгліца-Макбрайда зі значенням кількості комплексних експонент в моделі (4.1) не менше ніж 10. Додатково було визначено показник Хьорста для кожної вибірки вібраційних сигналів, отриманих для різних рівнів наповнення резервуару, за методикою R/S аналізу, наведеною в п. 4.4.

Оскільки найбільші значення навантаження на стінки резервуару будуть діяти у нижніх поясах резервуара, було прийнято рішення аналізувати ті вібраційні сигнали, які отримані в точках, що знаходяться на висоті близько $1/4$ від загальної висоти фізичної моделі резервуару.

Отримані узагальнені результати наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6.

Результати обробки вібраційних сигналів для різних рівнів наповнення резервуару

Рівень наповнення резервуару		0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
Складова ко- ливаний 1	Оцінка коефіцієнту згасання, $\hat{\alpha}_1$	-2,2	-10,8	-13,9	-33,9	-44,8
	Оцінка частоти \hat{f}_1 , Гц	445	476	444	465	449
Складова ко- ливаний 2	Оцінка коефіцієнту згасання, $\hat{\alpha}_2$	-20	-36	-39	-54	-102
	Оцінка частоти \hat{f}_2 , Гц	340	354	327	367	337
Показник Хьорста		0,484	0,460	0,447	0,444	0,396

Як видно з наведених результатів, застосовані методи аналізу показали можливість визначення зміни поточного функціонального стану резервуару за результатами оцінки показників коливаний та показника Хьорста вібраційних відкликів. Збільшення рівня наповнення резервуару призводить до збільшення (по модулю) величин коефіцієнтів згасання коливаний та до зменшення середнього за ансамблем вибірок значення показника Хьорста.

Для методу Штейгліца-МакБрайда за допомогою Вейвлет-перетворення та частотного аналізу було визначено дві домінуючі складові на частотах, які присутні в спектрах сигналів з обох датчиків при зміні рівня наповненості. Приклад Вейвлет-перетворення з розкладанням на шість рівнів зображено на рис. 6.7, воно є корисним інструментом для попередньої обробки сигналів оскільки дає можливість аналізувати їх в різних частотних діапазонах. Вейвлет-перетворення також дозволяє визначити кількість гармонічних складових у сигналі, що є корисною інформацією для визначення необхідного порядку моделі при обробці реальних сигналів методами Проні та Штейгліца-МакБрайда.

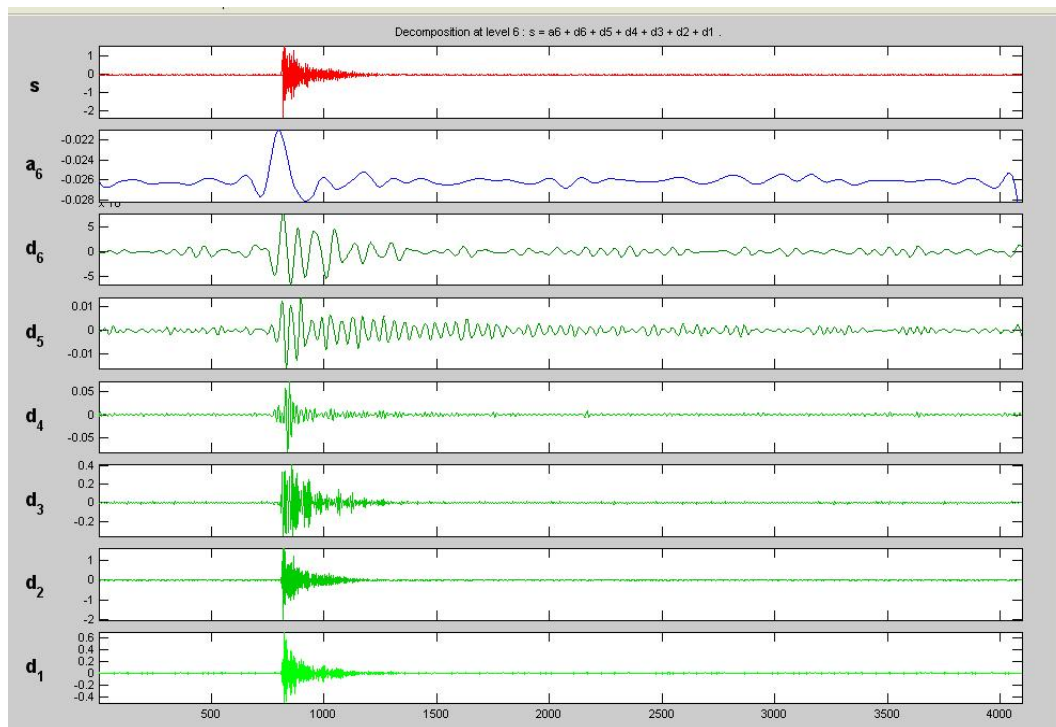


Рис. 6.7. Приклад Вейвлет-розкладання вібраційного відклику резервуару на імпульсне збурення

З отриманих результатів можна зробити висновок, що найбільш інформативною діагностичною ознакою є оцінка показника згасання 1, отримана на основі аналізу вібраційного сигналу та елементів його вейвлет-розкладання за методом Штейгліца-Макбрайда. Не зважаючи на незначне змінювання показника Хьорста, залежність його від рівня наповнення резервуару була використана в роботі [58] для розпізнавання функціонального стану резервуару нейромережовим класифікатором.

6.3.Лабораторні випробування макету каналу вимірювання кутового положення

6.3.1. Методика випробувань

Сигнали з каналу інклінометричних вимірювань, параметри яких характеризують просторове положення фізичної моделі резервуара, було отримано за розробленою в [3] методикою:

- 1) Перевірити коректність роботи інклінометричного каналу.
- 2) Встановити інклінометричний датчик на попередньо підготовлене місце закріплення.
- 3) На поворотній установці виставити кут нахилу, що дорівнює 0° , та зняти дані з інклінометра.
- 4) Пункт (3) повторити 5-10 разів для забезпечення повноти аналізу.
- 5) Змінюючи кут нахилу основи резервуара відносно площини горизонту в діапазоні від 0° до 20° з кроком 2° , повторити пункти (3)-(4).

Так як більшість існуючих інклінометрів за своїм принципом роботи є подібними до акселерометрів, то їх вихідний сигнал містить інформацію про вібраційне прискорення об'єкта, на який вони встановлюються. З цього можна зробити висновок, що вибірки необроблених даних, отриманих з інклінометричних каналів можна використовувати для визначення вібраційних характеристик об'єкта контролю.

6.3.2. Результати випробувань та їх аналіз

Дані з каналу вимірювання просторового положення резервуару знімалися з обох датчиків, встановлених у корпус блоку акселерометрів, який, у свою чергу, закріплювався на об'єкті контролю хомутом (рис. 6.8).



Рис. 6.8. Випробування для визначення просторового положення резервуару

Відповідно до наведеної вище методики, за допомогою спеціального поворотного стенду, на якому встановлювався резервуар, задавались кути нахилу від -20° до $+20^\circ$ з кроком 2° . У кожному положенні проводилося по 10 вимірювань, що дозволило покращити якість аналізу сигналів. Загалом було отримано 400 вибірок даних (рис. 6.9) довжиною 2024 точок, знятих з частотою 2000 Гц.

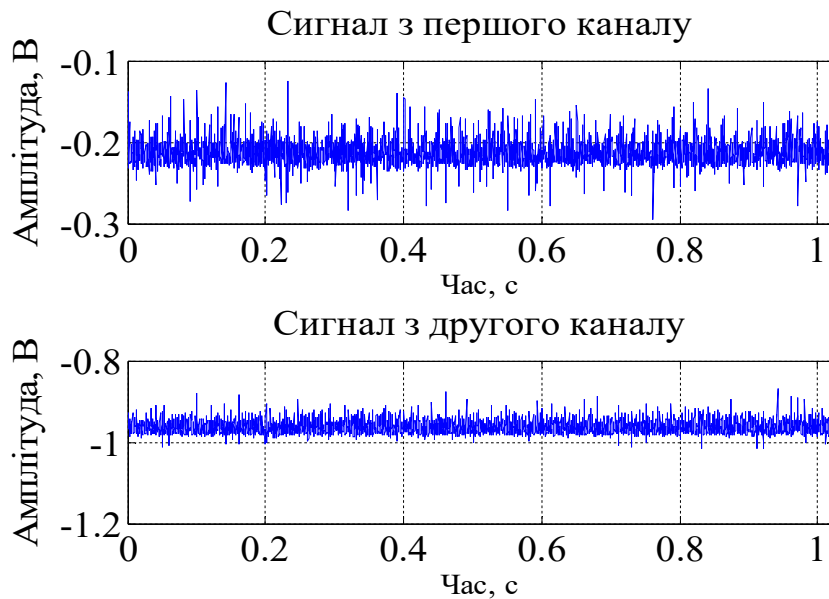


Рис.6.9. Приклад сигналу з каналу вимірювання кутового положення

Наступним етапом є виділення корисної складової сигналу, що характеризує просторове положення об'єкту. Одним з найбільш розповсюджених та простих у застосуванні методів виділення постійної складової з сигналу є використання фільтру низьких частот [60]. Саме цей метод і використовувався для виділення корисної складової з отриманих вибірок даних [3].

Значення частоти зрізу при обробці дорівнювало 15 Гц, залежності вихідної напруги датчиків інформації від значення кутів нахилу стенду наведено на рис. 6.10 та рис. 6.11. На графіках зображено дві криві, одна з них теоретична (червона крива, точки на якій відмічені плюсами), інша – отримана експериментальним шляхом (синя крива, точки на якій відмічені колами). Теоретичну криву було обраховано і побудовано для визначення правильності проведення та точності експерименту.

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок про відповідність експериментальних даних теоретичним. Зміщення експеримен-

тальної кривої відносно теоретичної на рис.6.10 може бути обумовлено неточністю встановлення другого датчику на сам блок, чи впливом перехресного прискорення, але слід відмітити, що при цьому характер зміни кривої відповідає теоретичній.

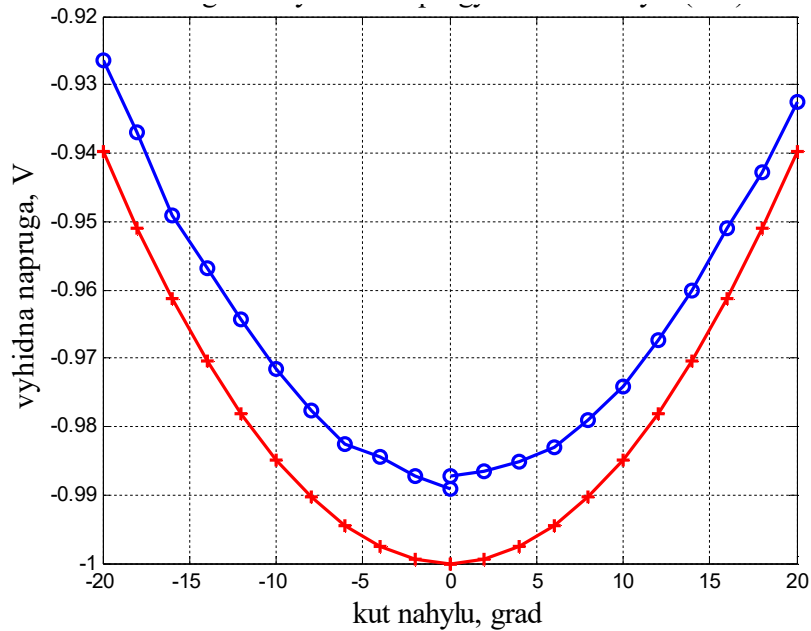


Рис. 6.10. Графіки залежності напруги від кута нахилу резервуару (сигнали другого акселерометра, вісь чутливості направлена вертикально)

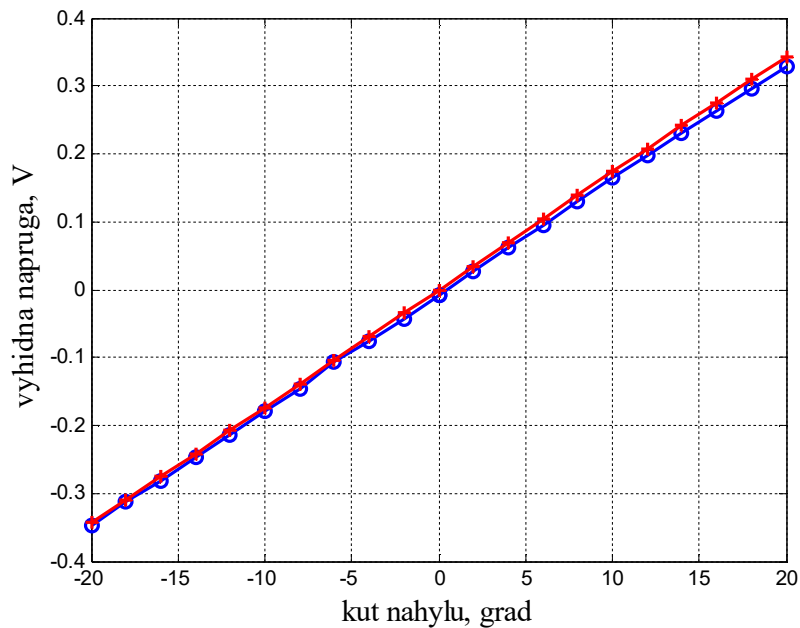


Рис. 6.11. Графіки залежності напруги від кута нахилу резервуару (сигнали першого акселерометра, вісь чутливості перпендикулярна до вертикалі)

При порівнянні результатів на рис. 6.10 та рис. 6.11 видно, що зміна напруги при відхиленні на 20° для другого датчика становить 0,06В, а для першого датчика - 0,34 В. Це означає, що для вимірювання просторового положення резервуару доцільно використовувати акселерометр, вісь чутливості якого направлена по перпендикуляру до вектора прискорення сили тяжіння. Це пов'язано з особливостями знаходження значень гармонічних функцій при малих кутах повороту.

Оскільки для таких об'єктів, як резервуар, необхідно контролювати відхилення стінок від вертикалі, виникає необхідність використання датчиків, у яких мінімум дві осі чутливості розташовані перпендикулярно вектору прискорення сили тяжіння та є перпендикулярними між собою, тобто необхідно проводити вимірювання відхилень як відносно повздовжньої, так і відносно поперечної осей об'єкта контролю.

6.4. Лабораторні випробування макету каналу тензометричних вимірювань

6.4.1. Методики випробувань

Випробування каналу тензометричних вимірювань проведено у два етапи. На першому етапі було виконано дослідження для перевірки працездатності та коректності роботи каналу, а на другому етапі було визначено функціональну залежність зміни деформації від зміни опору тензорезистора під дією тиску. Методики проведення цих випробувань розроблено в [3].

Методика 1 проведення досліджень коректності роботи каналу тензометричних вимірювань полягає в наступному:

1) Під'єднати до напівмостової схеми підключення два магазини опорів, один з магазинів буде відігравати роль опорного тензорезистора, а інший – вимірювального.

2) На обох магазинах опорів виставити опори, що дорівнюють 100 Ом, та зняти значення деформації.

3) Пункт (2) повторити 5-10 разів для забезпечення повноти аналізу.

4) Повторити пункти (2)-(3) для змінювань опору в магазині опорів, що відіграє роль вимірювального тензорезистора, в діапазоні 0-0,1Ом з кроком в 0,01Ом.

5) Повторити пункти (2)-(3) для змінювань опору в магазині опорів, що відіграє роль вимірювального тензорезистора, в діапазоні 0-1 Ом з кроком в 0,1 Ом.

6) Повторити пункти (5)-(6) при зворотній зміні опорів.

Методика 2 проведення лабораторних випробувань макету вимірювання деформації в залежності від зміни тиску:

1) Відповідно до вимог необхідно встановити тензорезистори на фізичну модель резервуару.

2) Під'єднати до напівмостової схеми два тензорезистори, один з яких буде опорним, а інший - вимірювальним.

3) Зняти дані з каналу тензометричних вимірювань при відсутності зовнішніх навантажень.

4) Пункт (3) повторити 5-10 разів для забезпечення повноти аналізу.

5) Створюючи тиск всередині резервуару у діапазоні 0-120 мм. рт. ст. з кроком 1 мм. рт. ст повторити пункти (3)-(4).

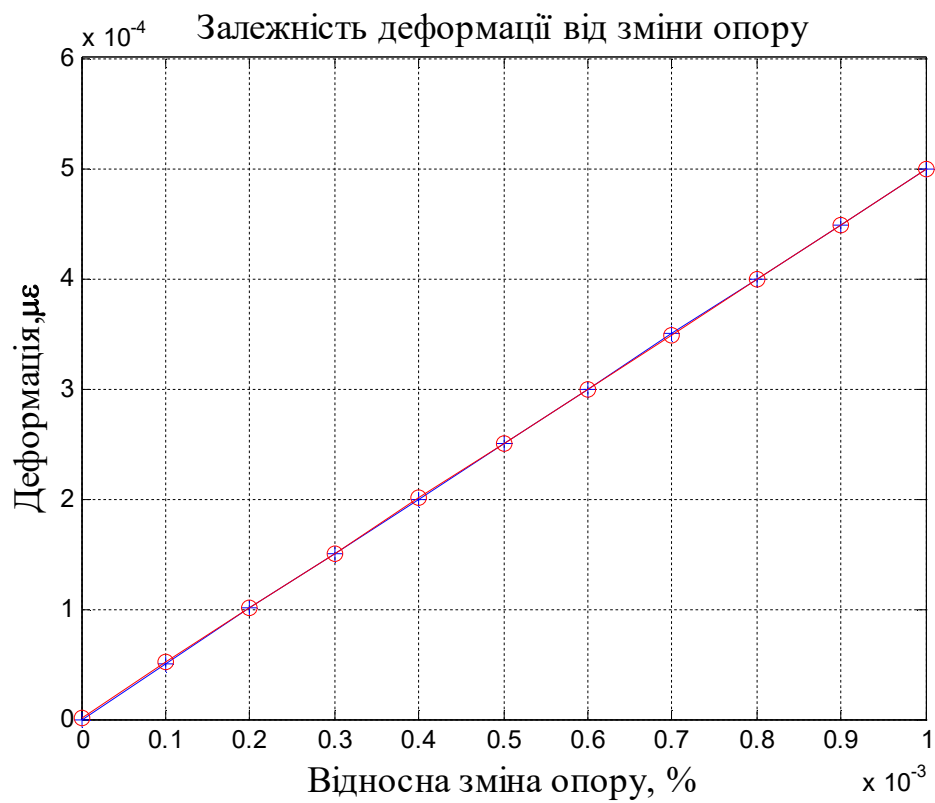
6) Створюючи тиск всередині резервуару у діапазоні 120-300 мм. рт. ст. з кроком 10 мм. рт. ст повторити пункти (3)-(4).

6.4.2. Результати випробувань та їх аналіз

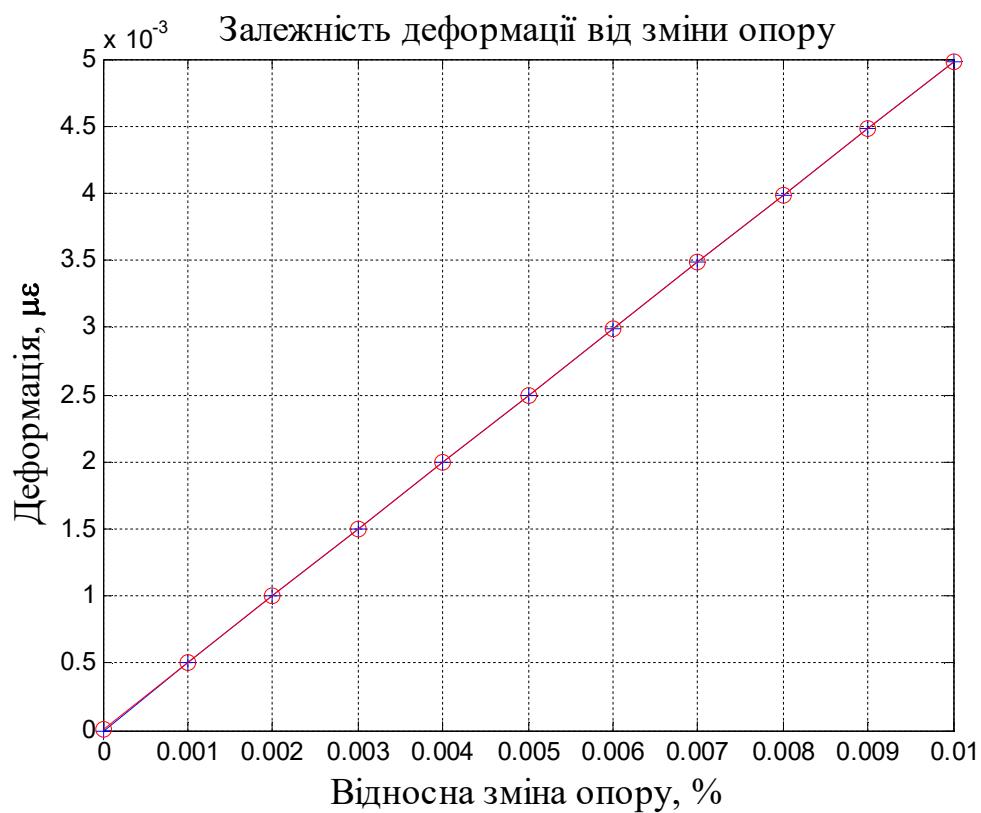
У процесі проведення лабораторних випробувань з метою перевірки коректності роботи каналу було отримано 440 вибірок даних, для кожного значення опору відповідно до методики 1 проведено по 10 вимірювань. Отримані результати було осереднені, за результатами побудовано функціональні залежності змінювання деформації від відносної зміни опору, графіки яких наведено на рис. 6.12.

Як показав аналіз результатів та представлені графіки, функціональні залежності змінювання деформації від відносної зміни опору тензорезисторів мають лінійний характер. Повністю відсутні гістерезисні ефекти, що свідчить про працездатність та коректність роботи макету каналу тензометричних вимірювань.

При дослідженні впливу зміни тиску всередині фізичної моделі резервуару на показники деформації використовувалася установка контролю анероїдно-манометричних приладів, як це проілюстровано на рис. 6.13. За допомогою даної установки в модель резервуару закачувалось повітря, величина створеного всередині об'єкту тиску відображалась на шкалі установки.



а)



б)

Рис. 6.12. Залежність змінювання деформації від відносної зміни опору в діапазоні: а) 0-0,1 Ом; б) 0-1 Ом

У цей же час відбувалось вимірювання даних про деформацію стінок, в результаті було отримано залежність величини деформації стінок фізичної моделі резервуару від величини тиску всередині, яку наведено на рис. 6.14.



Рис. 6.13. Дослідження впливу зміни тиску всередині фізичної моделі резервуару на показники деформації

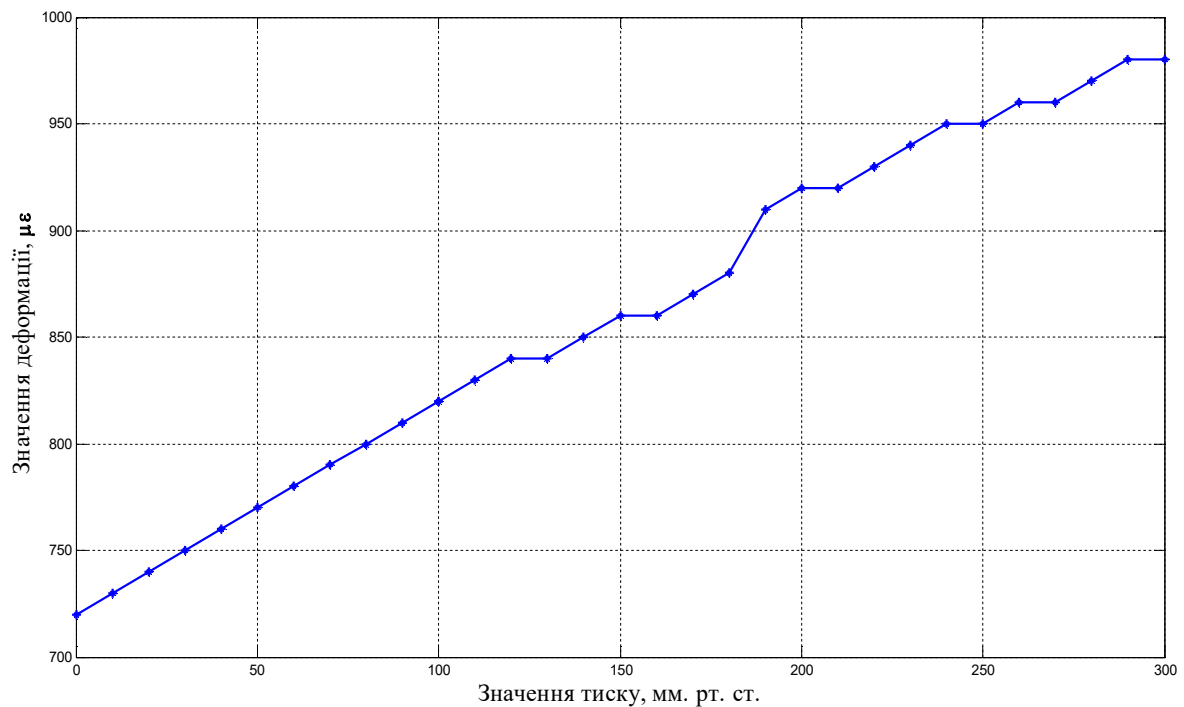


Рис. 6.14. Експериментальна залежність зміни деформації від зміни тиску

Дослідження проводились при напівмостовому підключенні тензорезисторів, які були попередньо установлені на резервуар, їх осі чутливості розташовані перпендикулярно одна до одної [70]. Як видно з наведеної на рис. 6.14 залежності, до значення тиску, що дорівнює 120 мм. рт. ст. залежність має лінійний характер. При подальшому збільшенні тиску значення деформації змінюється з деякими відхиленнями від лінійної залежності, що пов'язано з особливостями конструкції фізичної моделі об'єкта контролю.

6.5. Випробування діагностичного серверу з датчиками вібрації

Діагностичний сервер може бути реалізований двома шляхами: апаратно та програмно. Головною ознакою в обох випадках є здатність машини чи програми переважну більшість часу працювати автономно, без втручання людини реагуючи на зовнішні події відповідно до встановленого програмного забезпечення. Втручання людини відбувається під час встановлення серверу і під час його сервісного обслуговування (зазвичай це роблять окремі адміністратори серверів з вищою кваліфікацією).

У розробленій системі моніторингу [3] сервер реалізовано апаратними засобами, як комп'ютер у локальній чи глобальній мережі, який надає користувачам свої обчислювальні і дискові ресурси, а також доступ до встановлених сервісних ресурсів. Найчастіше сервер працює цілодобово чи безпосередньо під час роботи первинних перетворювачів.

Для оцінки роботи серверу було розроблено його імітаційну модель на основі віртуального приладу «ВП-сервер». Дослідження проводились з використанням та акселерометрів фірми Colibrys марки MS 8002.D, які є основою розробленого макету каналу вимірювання вібрації та макету каналу інклінометричних вимірювань.

6.5.1. Методика випробувань

Інформаційну модель серверу реалізовано за допомогою віртуального приладу «ВП-сервер» при дротовому надходженні даних з датчиків вібрації за допомогою зовнішнього блоку АЦП E14-140. Методику проведення перевірки працездатності інформаційної моделі діагностичного серверу розроблено в [3]:

- 1) Підключити USB дріт зовнішнього блоку АЦП E14-140 до ПК.

2) Підключити канал 1 і канал 2 АЦП до інформаційних каналів акселерометрів MS8002 D.

3) Розмістити акселерометри так, щоб вісь чутливості першого датчика лежала на площині горизонту, а вісь чутливості другого - була перпендикулярною площині горизонту.

4) Запустити ВП «ВП-сервер» на персональному комп'ютері, попередньо задати у налаштуваннях:

- Частоту дискретизації на канал – 2кГц.
- Кількість точок на канал – 1000.
- Розмір буферу екрану – 1000.
- Кількість каналів – 2.
- Перевести перемикач у положення дровового отримання даних.

5) Під час відображення сигналів з датчиків здійснити одиничний удар і записати у файл, повторити 5-10 разів для забезпечення повноти аналізу

6.5.2. Результати випробувань

При дрововому надходженні даних на «ВП-сервер» до входів зовнішнього блоку АЦП були підключені два акселерометри, осі чутливості яких розміщені взаємно перпендикулярно. Осі акселерометрів розміщувались в напрямку по вертикалі місця, та в напрямку, перпендикулярному до вертикалі. На рис. 6.15 зображено вкладку лицьової панелі віртуального приладу «ВП-сервер» [3], на якій відображаються сигнали, зареєстровані від двох акселерометрів у стані спокою, а на рис. 6.16 – вкладку з сигналами цих акселерометрів, які є результатом вимірювання імпульсного відклику об'єкта при його ударному збуренні (точки прикладення ударних збурень та вимірювання імпульсних відкликів фізичної моделі резервуару виконано у відповідності до наведеної в п. 6.2.1 методики вібраційних випробувань).

Як видно з наведених ілюстрацій роботи віртуального приладу, на лицьовій панелі успішно відображаються виміряні та передані вібраційні сигнали у різних режимах (без зовнішнього збурення та із збуренням об'єкта контролю). Окремо проведено дослідження збереження і відтворення збереженого сигналу з першого каналу, при знятті даних з двох каналів. Результат дослідження проілюстровано на рис. 6.17, де зображено вкладку «Збережені сигнали» лицьової панелі віртуального приладу. На вкладці відображається, збережений з першого каналу сигнал акселерометра при прикладеному до

об'єкта ударному збуренні. Частота дискретизації АЦП становить 2кГц, кількість точок на канал, що надсилаються, становить 4000, розмір буфера екрану – 1000 точок.

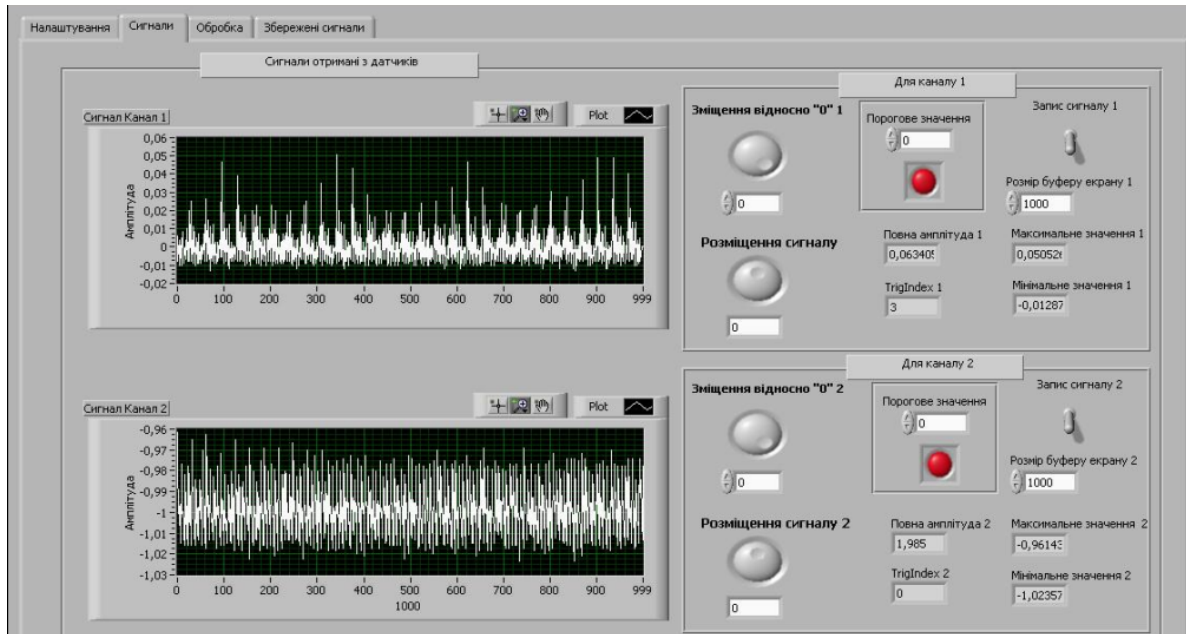


Рис. 6.15. Приклад вкладки з сигналами акселерометрів у стані спокою

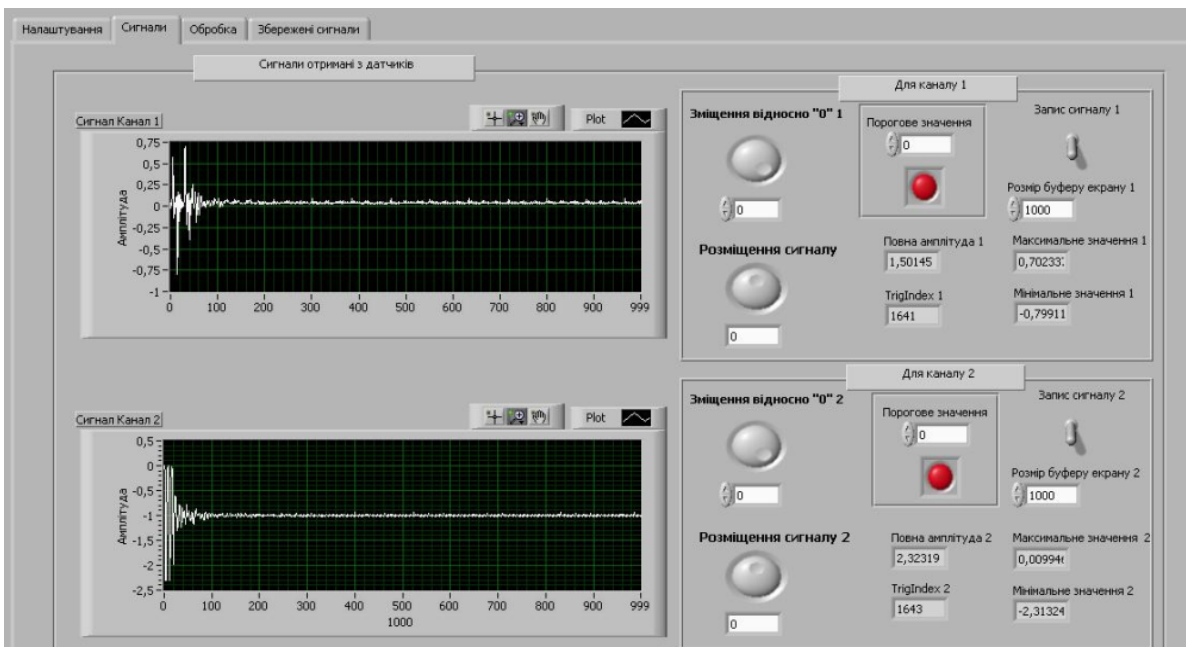


Рис. 6.16. Приклад вкладки з сигналами акселерометрів при ударному збуренні об'єкта

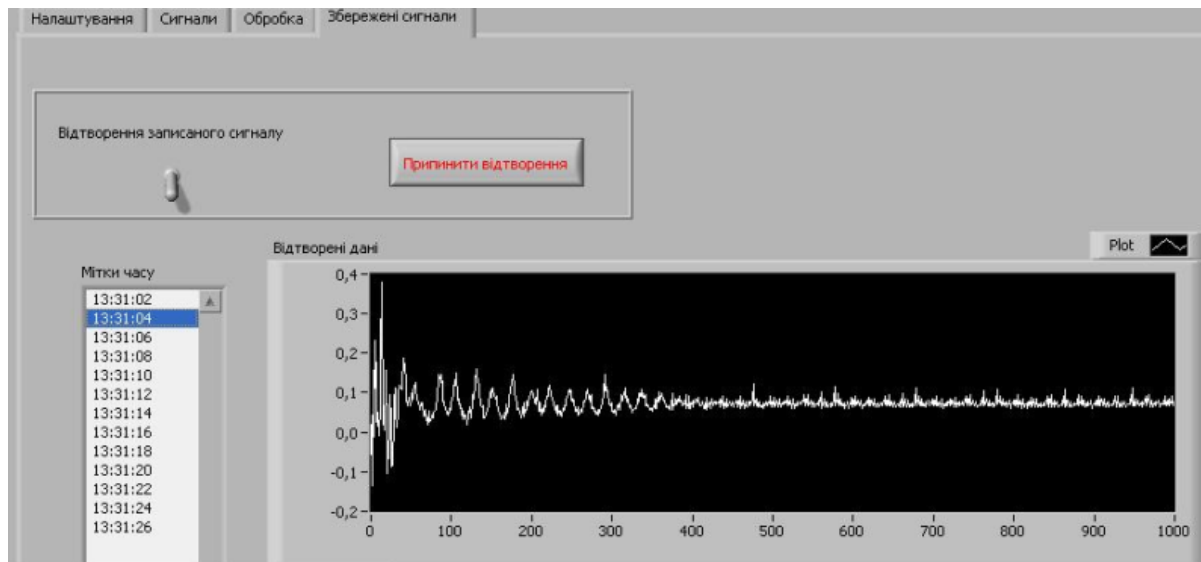


Рис. 6.17. Приклад вкладки з відтворенням збереженого сигналу акселерометра, отриманого при ударному збуренні об'єкта

Отримані результати випробувань діагностичного серверу з датчиками вібрації показали, що:

- робота віртуального приладу «ВП-сервер», який є інформаційною моделлю діагностичного серверу, при дротовій передачі даних з датчиків вібрації є коректною, зокрема при виконанні функції запису та візуалізації сигналів (як у стані спокою, так і при збуренні об'єкта); інструменти для роботи з сигналами забезпечують коректне виконання функцій.
- запису і відтворення збереженого сигналу є коректними, сигнали записуються вибірками фіксованого розміру.

Передачу діагностичних даних від датчиків інформації на діагностичний сервер можна реалізувати і як бездротову передачу даних, наприклад, розробленим в [3] модулем на основі мікро контролеру ESP8266. Модуль ESP8266 працює в режимі точки доступу, до якої підключається персональний комп'ютер (сервер, клієнт). Обмін інформацією відбувається через протокол TCP/IP, який є універсальним та зручним, оскільки він підтримується усіма комп'ютерами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сидоренко В.Л. До питання визначення поняття «небезпечний об'єкт» / В.Л. Сидоренко, С.А. Єременко, С.І. Азаров// Право і безпека. – 2006. - №55. – С. 151-155.
2. Цибульник С. О. Вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів на основі імітаційного моделювання : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Цибульник Сергій Олексійович. – К., 2016. – 186 с.
3. Розробка методичного забезпечення та макетного зразку системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring [Текст]: звіт про НДР (заключний)/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; кер. Бурау Н.І.; вик.: Півторак Д.О., Цибульник С.О. [та ін.]. – К., 2016. – 194 с. – № ДР 0115U0003188.
4. Резервуары и технологическое оборудование [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.gazovik-neft.ru/directory/info/fire-fighting/p-01.html>.
5. ДБН В.1.2-5:2007 Науково-технічний супровід будівельних об'єктів [Текст]. – К.: Мінрегіобуд України, 2007. – 17с.
6. ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008 Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів [Текст]. – Введ. 16.12.07/2008. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 13с.
7. ВБН 2.2-58-2-94 Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа [Текст]. – Введ. 04.08.1994. – К.: Держкомнафтогаз України, 1994. – 102 с.
8. Макаренко О.А. Ресурс стальних резервуаров / О.А. Макаренко, В.В. Кравцов, И.Г. Ибрагимов. – М.: Недра, 2008. – 190 с.
9. Комплексний аналіз технічної документації на інфраструктуру української антарктичної станції Академік Вернадський [Текст]: звіт про НДР / НТУУ «КПІ»; кер. Бурау Н.І.; вик. Шевчук Д.В. [та інші]. – К., 2010. – 129 с. – № ДР 0110U004991.
10. The Replacement of Fuel Tanks at Vernadsky Station [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30_ip030_e.doc.

11. Кондрашова С.Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров / С.Г. Кондрашова, М.Н. Назаров // Нефтегазовое дело. – 2004. – С. 8-15.
12. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. – Введ. 2007.01.01. – Київ: Мінбуд України, 2006. – 75 с.
13. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – введ. 26.12.89. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 10 с.
14. Технічний контроль [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://uk.wikipedia.org/wiki/Технічний_контроль#cite_note-DSTU3021-1.
15. Федотов А. В. Основы теории надежности и технической диагностики [Текст] / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. – Омск: ОмГТУ, 2010. – 64 с.
16. Неугодинов А.П. Мониторинг строительных конструкций в промышленном и гражданском строительстве: концепция, реализация, перспективы / А.П. Неугодинов, М.Ю. Ахлебинин, Ф.А. Егоров // Второй международный симпозиум «Проблемы современного бетона и железобетона». – Минск, 2009. – XI. – 11 с.
17. ДСТУ EN 1330-2:2008. Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 2. Загальні терміни стосовно методів неруйнівного контролю. – Введ. 01.01.2010. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2008. – 11 с.
18. Білокур І. П. Основи дефектоскопії: Підручник/ І.П. Білокур. — К.: Азимут-Україна, 2004. — 496 с.
19. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
20. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я.Балицкий, М.А.Иванова, А.Г.Соколова, Е.И.Хомяков. – М.: Наука, 1984. – 119 с.
21. Стандартизація у сфері вібрації, контролю технічного стану, діагностики та прогнозування ресурсу промислових машин / А.А. Стеценко, Б.М. Родель, В.О. Залога, З.А. Здельнік// Вісник СумДУ. – 2005. - №1 (73). – с. 113 – 122.
22. ДСТУ Б В.2.6-25-2003 Конструкція будинків і споруд. Автоматизовані системи технічного діагностування будівельних конструкцій [Текст]. – Введ. 24.02.2003. К.: Державний комітет України з будівництва і архітектури, 2003. – 23 с.

23. Вимоги до розробки інформаційно-діагностичного комплексу моніторингу резервуарів з паливом в умовах Антарктики/ Н.І. Бурау, Ю.Г. Жуковський, О.В. Кузько, С.О. Цибульник, Д.В. Шевчук// Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – Вип.. 45. – С. 107-115.
24. Розробка автоматизованої системи раннього попередження можливості витоку палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський [Текст]: звіт про НДР / НТУУ «КПІ»; кер. Бурау Н.І.; вик. Цибульник С.О. [та інші]. – К., 2013. – 177 с. – № ДР0113U004970.
25. Hoon S. A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001 / S. Hoon, C. Farar, Froncois M. Hemez et.al. // Los Alamos National Laboratory Report. – LA-13976-MS. – 2004. – 311 p.
26. History, Current Status and Challenges to Structural Health Monitoring System Aviation Field / A. K. Abid, Z. Suhaib, S. K. Nadeem, M. Zahid // Journal of Space technology. – 2014. – Vol. 4. – № 1. – P. 67-74.
27. Adams D. Health monitoring of structural materials and components: methods with applications / D. Adams. – John Wiley & Sons Ltd., 2007. – 475 p.
28. Staszewski W. Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing / W. Staszewski, C. Boller, G. Tomlinson. – John Wiley & Sons Ltd., 2004. – 288 p.
29. Рупіч С.С. Багатокласове розпізнавання стану складного просторового об'єкта нейромережевим класифікатором: дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Рупіч Сергій Сергійович. – К., 2019. – 201 с.
30. Speckmann H. Structural Health Monitoring: A Contribution to the Intelligent Aircraft Structure / H. Speckmann, H. Roesner. – Airbus, Bremen, Germany : ECNDT, 2006. – Tu.1.1.1.
31. Перспективы использования бортовых автоматизированных систем контроля выработки усталостного ресурса авиационных конструкций / С. Р. Игнатович, М. В. Карускевич, Н. И. Бурау, В. С. Краснопольский // Вісник Тернопільського Національного технічного університету : спеціальний випуск. Ч. 2. – Тернопіль : 2011. – С. 136-143.
32. Структурно-функціональний синтез систем діагностики конструкцій в експлуатації / Н. І. Бурау, О. М. Павловський, Д. В. Шевчук // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. – № 4 (72). – С. 77-86.
33. Problems of intellectualizing in the SHM systems: estimation, prediction, multi-class recognition / N. Bouraou, S. Rupich, S. Tsybulnik // Вісник

- Тернопільського національного технічного Університету. – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2017. – Vol 88. – No 4. – P. 135-144.
34. Імітаційне та фізичне моделювання автоматизованої системи запобігання витокам палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський [Текст]: звіт про НДР / НТУУ «КПІ»; кер. Бурау Н.І.; вик. Цибульник С.О. [та інші]. – К., 2015. – 152 с. – № ДР0115U005639.
35. ДБН В.2.6-163:2010 Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу, 2011. – 127 с.
36. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. / Р. Галлагер – М.: Мир, 1984. – 428 с.
37. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001.– 448 с.
38. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93.3 кПа. – Чинний з 1994.10.01 – К.: Держкомнафтогаз України, 1994. – 98с.
39. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks/Bouraou N.I., Lukianchenko O., Tsybulnik S., Shevchuk D.// Vibration in Physical Systems. – 2016. – Vol. 27. – pp.55-60.
40. Лук'янченко О.О. Динамічний аналіз системи двох з'єднаних циліндричних оболонок [Текст] / О.А. Киричук, О.О. Лук'янченко, О.В. Кузько // Зб. Опір матеріалів та теорія споруд. – К.: КНУБА, 2012. – Вип.90. – С.40-46.
41. Лук'янченко О.О. Несуча спроможність паливного резервуара в системі з захисною ємністю [Текст] / О.А. Киричук, О.О. Лук'янченко, О.В. Кузько // Зб. Опір матеріалів та теорія споруд. – К.: КНУБА, 2013. – Вип.91. – С.76-83.
42. Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks/ O.O. Lukianchenko, N.I.Bouraou, O.V. Kostina, O.V. Kuzko//Strength of Materials. – 2016. – Vol. 48. - Issue 3. – pp. 401–410.
43. Corrosion fatigue and multiple site damage reliability analysis / P. Shi, S. Mahadevan // Internation Jornal of Fatigue. – 2003. – Vol. 25 (6). – P. 457-469.
44. Игнатович С. Р. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных: монография / С. Р. Игнатович, М. В. Карусевич. – К. : НАУ, 2014. – 260 с.
45. Розробка підсистем візуалізації та прийняття рішення про стан об'єкта в автоматизованій системі запобігання витокам палива на українській

- антарктичній станції Академік Вернадський [Текст]: звіт про НДР / КПІ ім. Ігоря Сікорського; кер. Бурау Н.І.; вик. Цибульник С.О. [та інші]. – К., 2017. – 103 с. – № ДР0117U001689.
46. Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition / N. Bouraou, S. Rupich, O. Lukianchenko, O. Kostina // Vibrations in Physical Systems. – 2018.– Vol. 29. – P. 8.
47. Модальний аналіз захисної ємності резервуара з урахуванням послідовного виникнення дефектів у зварних швах стінки/ Лук'янченко О.О., Бурау Н.І., Костіна О.В., Геращенко О.В.// Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірн.- К:КНУБА, 2019.- Вип. 102. - С.159-170.
48. Пат. 82968 Україна, МПК G01M 7/00. Автоматизований діагностичний комплекс моніторингу і прогнозування технічного стану будівель і споруд [Текст] / Бурау Н. І., Жуковський Ю. Г., Кузько О. В., Цибульник С. О., Шевчук Д. В., Артем'єва Г. М.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – № U201301413; заявл. 06.02.2013; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16.
49. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. – Введ. 27.11.2007. – М.: Стандартинформ, 2008. – 15 с.
50. Методические рекомендации по применению датчиков вибрации, методам обработки полученных данных и способам диагностики состояния оборудования на основе данных виброизмерений. – Омск.:ООО «НТФ «Микроникс», 2004. – 73 с.
51. Сандерсон П. Акселерометры компании Meggitt: решения для задач любой сложности/ П. Сандерсон, Ю.Пономарев// Компоненты и технологии. – 2017. - №11. – С. 24-27.
52. Бесконтактное измерение вибрации для мониторинга оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://evolution.skf.com/ru/бесконтактное-измерение-вибрации>
53. Тензометрия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Тензометрия>.
54. Оптико-поляризационный тензометрический датчик «ТД-16оп»: отраслевой кат. / Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники СО РАН. – Новосибирск.: КузНИИшахтстрой, 2010. – 2с.
55. Розробка комплексної інтелектуальної системи моніторингу технічного стану конструкцій в експлуатації [Текст]: звіт про НДР (заключний)/

- НТУУ «КПІ»; кер. Бурау Н.І.; вик.: Півторак Д.О., Цибульник С.О. [та ін.]. – К., 2014. – 236 с. – № ДР0113U000498.
56. Механические и электрические тензометры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.devicesearch.ru/article/8523>
57. Лунёв Э.Ю. Цифровой инклинометр (акселерометр) ММА7260Q / Э. Ю. Лунёв // Chip News. – 2006. – № 15. – С. 108-114.
58. Бурау Н.І. Імітаційне моделювання та обробка вібраційних сигналів для моніторингу конструкцій в експлуатації/ Бурау Н.І., Шевчук Д.В.// Вісник Інженерної академії України. – 2015. - № 4. – С.14-19.
59. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ [Текст] / С.Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
60. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие [Текст] / А.Б. Сергиенко. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768с.
61. Кононюк А. Е. Дискретно-непрерывная математика. (Поверхности [Текст])/ А.Е. Кононюк. — В 12-и кн. Кн.6. ч.2.— К.: Освіта України, 2016.—618 с.
62. Бурау Н.І. Інтерпретація вібраційних сигналів складної роторної системи на основі фрактального аналізу/ Н.І. Бурау, О.Я. Паздрій// Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2019. – №7/159 . – С.114-121.
63. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных [Текст]/О.В. Чумак. — М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. — 164 с.
64. Методы прогнозной экстраполяции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rae.ru/monographs/10-168>.
65. Садовникова Н.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. Учебное пособие [Текст] / Н.А. Садовникова, Р.А. Шмойлова / Московский государственный университет экономики, статистики и информатики. – М., 2001 – 67 с.
66. Пат. 2374682 РФ, МПК G06F17/17. Способ прогнозирования результатов измерений и устройство его реализующее / Марчук В.И., Шерстобитов А.И. и др.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ЮРГУЭС». – № 2008104547/09; заявл. 06.02.2008; опубликовано 27.11.2009.
67. Радиотехнические системы передачи информации/ Борисов В.А., Калмыков В.В., Ковальчук Я.М. и др. – М.: Радио и связь, 1990. – 304с.
68. Bouraou N. Investigation of the model of the vibration measuring channel of the complex monitoring system of steel tanks / Bouraou N., Tsybulnik S.,

Shevchuk D.// EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. –2015. – Vol. 5. – №9 (77). – P. 45-52.

69. Бурау Н.І. Багато класове розпізнавання функціонального стану резервуару за зміною показника Херста вібраційного сигналу/ Н.І. Бурау, С.С. Рупіч, Д.В. Шевчук// Вісник Інженерної академії України. – 2019. - №1. – С. 7-11.
70. Шевчук Д.В. Дослідження каналу вимірювання деформації системи моніторингу будівель і споруд в експлуатації / В.М. Зайцев, Д.В. Шевчук // Вісник інженерної академії України. – Київ, 2017. – №1. – С. 217-221.

ПЕРЕДМОВА.....	3
 1. ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВУАРІВ З ЕКОЛОГО-НЕБЕЗПЕЧНИМИ РЕЧОВИНАМИ.....	 5
1.1. Загальна характеристика резервуарів як об'єктів для зберігання еколого-небезпечних речовин	5
1.2. Фактори, які впливають на зміну технічного стану резервуарів ..	8
1.3. Діагностика резервуарів для попередження їх пошкоджень та руйнування.....	13
1.3.1. Основні види технічної діагностики.....	13
1.3.2. Етапи функціональної діагностики.....	14
1.3.3. Загальна характеристика методів неруйнівного контролю.	16
1.3.4. Автоматизовані системи моніторингу та діагностики.....	20
1.4. Системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring.....	26
 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СТІЙКОСТІ МОДЕЛІ РЕЗЕРВУАРУ ДЛЯ РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	 31
2.1. Розробка діагностичної моделі бездефектного резервуару.....	31
2.1.1. Загальна характеристика резервуару як об'єкту діагностики.....	31
2.1.2. Побудова скінчено-елементної моделі резервуару.....	32
2.2. Дослідження напружено-деформованого стану конструкції при дії статичних навантажень.....	34
2.2.1. Статичний розрахунок при дії навантаження від ваги пального.....	36
2.2.2. Статичний розрахунок при дії температури.....	40
2.2.3. Статичний розрахунок при навантаженні від ваги обладнання та додаткових елементів конструкції.....	41
2.2.4. Статичний розрахунок при дії снігового навантаження.....	43
2.2.5. Статичний розрахунок при дії комбінованого навантаження.....	44

2.3.	Дослідження статичної стійкості конструкції при дії навантаження від ваги пального.....	47
2.4.	Модальний аналіз бездефектного резервуару.....	50
3.	МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НА ПАРАМЕТРИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РЕЗЕРВУАРУ.....	54
3.1.	Аналіз впливу корозії металу на несучу здатність резервуару....	54
3.1.1.	Побудова моделі внутрішньої ємності резервуару.....	54
3.1.2.	Вплив корозії металу на несучу здатність внутрішньої ємності резервуару.....	55
3.1.3.	Вплив корозії металу на несучу здатність резервуару.....	58
3.2.	Аналіз впливу тріщини в зварних швах ємностей резервуару на параметри напружено-деформованого стану та стійкість.....	59
3.2.1.	Моделювання тріщини.....	59
3.2.2.	Вплив тріщин у зварних швах внутрішньої ємності.....	60
3.2.3.	Вплив тріщин у зварних швах зовнішньої ємності.....	63
3.3.	Аналіз впливу пошкоджень на динамічні характеристики резервуару.....	65
3.4.	Аналіз впливу багатоосередкового пошкодження в зварних швах на параметри напружено-деформованого стану.....	67
3.4.1.	Моделювання багатоосередкового пошкодження.....	67
3.4.2.	Напружено-деформований стан ємності з двома горизонтальними тріщинами в одному поясі.....	68
3.4.3.	Напружено-деформований стан ємності з вертикальними та горизонтальними тріщинами в різних поясах оболонки.....	70
3.5.	Динамічні характеристики резервуару при багатоосередковому пошкодженні.....	73
4.	СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РЕЗЕРВУАРУ.....	76
4.1.	Загальна структура системи моніторингу та функціональної діагностики резервуарів.....	77
4.2.	Датчики первинної інформації системи моніторингу.....	81
4.2.1.	Датчики вібрації.....	82
4.2.2.	Тензометричні датчики.....	86
4.2.3.	Інклінометри.....	88

4.3.	Керування процесом моніторингу.....	89
4.4.	Обробка діагностичної інформації.....	91
4.5.	Візуалізація даних в системі моніторингу.....	96
5.	ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДСИСТЕМ І БЛОКІВ СИСТЕМИ	
	МОНІТОРИНГУ.....	102
5.1.	Реалізація підсистеми візуалізації даних комплексних вимірювань напружень та кутового положення резервуару.....	102
5.1.1.	Написання основного коду програми.....	102
5.1.2.	Створення геометричної моделі об'єкта.....	105
5.1.3.	Перевірка працездатності програми візуалізації на основі імітаційного моделювання.....	107
5.2.	Візуалізація даних прогнозу рівня деформації елементів конструкцій резервуару.....	110
5.3.	Віртуальний прилад для опитування датчиків інформації.....	115
5.4.	Віртуальний прилад для передачі, збереження та аналізу діагностичних даних.....	119
6.	РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ	
	МАКЕТНОГО ЗРАЗКУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ.....	121
6.1.	Макетний зразок системи структурного моніторингу.....	121
6.1.1.	Макет каналу вимірювання вібрації.....	122
6.1.2.	Макет каналу вимірювання кутового положення.....	127
6.1.3.	Макет каналу тензометричних вимірювань.....	128
6.1.4.	Лінії зв'язку.....	129
6.1.5.	Перетворюючий пристрій.....	130
6.2.	Лабораторні випробування макету каналу вимірювання вібрації	131
6.2.1.	Методика випробувань.....	131
6.2.2.	Результати випробувань та їх аналіз.....	132
6.3.	Лабораторні випробування макету каналу вимірювання кутового положення.....	138
6.3.1.	Методика випробувань.....	138
6.3.2.	Результати випробувань та їх аналіз.....	139
6.4.	Лабораторні випробування макету каналу тензометричних вимірювань.....	142
6.4.1.	Методики випробувань.....	142

6.4.2. Результати випробувань та їх аналіз.....	143
6.5. Випробування діагностичного серверу з датчиками вібрації.....	146
6.5.1. Методика випробувань.....	146
6.5.2. Результати випробувань.....	147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	150

Наукове видання

Бурау Надія Іванівна, доктор технічних наук, професор
Лук'янченко Ольга Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент,
старший науковий співробітник
Костіна Олена Володимирівна, кандидат технічних наук, старший
науковий співробітник
Цибульник Сергій Олексійович, кандидат технічних наук

СТРУКТУРНИЙ МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ

Монографія